



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría
de Estructuras

PROYECTO FIN DE CARRERA

ESTUDIO DE LA OPTIMIZACIÓN DEL CHASIS DE UN VEHÍCULO DE FÓRMULA SAE

Autora: Elia Greciano Barrado

Dirigido por: Jesús Pernas Sánchez

Leganés, Octubre 2012

Título: Estudio de la optimización del chasis de un vehículo de Fórmula SAE

Autora: Elia Greciano Barrado

Tutor: Jesús Pernas Sánchez

EL TRIBUNAL

Presidente:

David Varas Doval

Vocal:

Higinio Rubio Alonso

Secretario:

Álvaro Vaz-Romero Santero

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 31 de Octubre de 2012 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de:

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Agradecimientos

Dedico este proyecto, que supone la culminación de mi carrera, a todos aquellos que, de un modo u otro, han formado parte de ella.

Gracias a mis padres y hermanas, Carlos, Isabel, Carla y Lupe, que, con infinita paciencia, han sido mi guía durante todo este tiempo, y que, aunque no estén seguros de lo que he hecho o estudiado, han sentido mis lágrimas y mis alegrías tanto o más que yo. Y especialmente a mi madre, que sin su sufrimiento y su devoción, todo esto no hubiese sido posible.

A mi familia en general, que me quieren y se alegran por mí como pocas familias hacen, y que siempre han estado ahí.

A Miguel, mi mejor amigo, mi compañero de estudio, mi apoyo incondicional, que ha sido mi consuelo en momentos difíciles, que, con su optimismo y bondad, ha contrarrestado mi pesimismo y mal humor.

Al tutor de este proyecto, Jesús, gracias por la paciencia y comprensión que ha tenido. Gracias por embarcarse conmigo, casi a ciegas en este proyecto, y que ha conseguido que haya cobrado forma.

A mis amigos de la universidad, que, con ellos cuatro, he compartido tantas comidas, tantos buenos y malos ratos, y que me entienden como nadie, porque han sufrido igual que yo.

Y gracias a todos los profesores que he tenido en esta universidad, que me han transmitido, no sólo conocimientos de ingeniería, sino también de la vida.

Y por último, a todos los que no están aquí, pero estén donde estén, sé que estarán orgullosos.

A todos vosotros, GRACIAS.

Resumen

La fórmula SAE es una competición en la que estudiantes de diferentes universidades realizan un vehículo de competición, que se verá sometido a diversas pruebas para evaluar sus características.

Bajo este entorno se desarrolla una de las piezas fundamentales en este tipo de vehículos, el chasis. El chasis aporta la rigidez estructural necesaria para la seguridad del piloto, además de soportar el peso del resto de elementos del vehículo.

Con el objetivo de ser competitivos, se presenta indispensable el estudio del uso de nuevos materiales, alternativos al acero convencional, como son las aleaciones de aluminio o la fibra de carbono, que permitan resistencia igual o mayor, aligerando el peso del monoplaza.

Con la colaboración del equipo de fórmula SAE de la “Università di Pisa”, Italia, se ha realizado una comparativa de varios modelos de chasis, en términos de rigidez, peso y coste, para determinar qué camino se debería seguir para obtener una ventaja competitiva en futuras competiciones, sin comprometer el presupuesto del equipo.

Palabras clave: *Chasis; FSAE; Torsión.*

Abstract

Formula SAE is a competition in which students from different universities build a competition car, which will be put under different tests to evaluate its characteristics.

Under this environment it develops one of the most important parts in this types of vehicles, the chassis. The chassis give the structural stiffness needed for the pilot's safety, and it support the weight of the rest of the car's elements.

Facing the goal of being competitive, it is imperative the study of the use of new materials, as alternative to the conventional steel, like the aluminium alloys or carbon fibre, which allow equal or better resistance, lowering the car's weight.

With the collaboration of the FSAE racing team from the University of Pisa, Italy, it has been developed a comparative study of several chassis models, in terms of stiffness, weight and cost, to determine which path should be followed to get a competitive advantage in future competitions, without compromising the team's budget.

Keywords: *Chassis; FSAE; Torsion.*

Índice

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS	2
1.2	ACERO	3
1.3	ALUMINIO	4
1.4	MATERIALES COMPUESTOS	6
1.5	LA FÓRMULA SAE	9
1.5.1	E-TEAM: PISA UNIVERSITY'S RACING TEAM	10
1.6	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	12
1.7	ESTRUCTURA DE LA MEMORIA	16
2	ANTECEDENTES	18
2.1	CHASIS EN LA FÓRMULA SAE	18
2.2	CHASIS EN EL E-TEAM, UNIVERSITY OF PISA	19
2.2.1	CHASIS REALIZADO EN ACERO	19
3	NORMATIVA SAE REFERENTE AL CHASIS	23
3.1	INTRODUCCIÓN	23
3.2	ESPECIFICACIONES DE LA ORGANIZACIÓN	23
3.3	ESPESORES DE PROTECCIONES	25
3.4	ARCOS DE SEGURIDAD	26
3.5	PLANO FRONTAL ENCARGADO DE PROTEGER LOS PIES DEL PILOTO	29
3.6	PROTECCIÓN DE IMPACTOS LATERALES	29
3.7	OTRAS CONSIDERACIONES	30
4	ANÁLISIS NUMÉRICO DEL CHASIS	32
4.1	ESTUDIO DE CHASIS DE ACERO	32
4.1.1	DESCRIPCIÓN DEL MODELO INICIAL	32
4.1.2	DEMOSTRACIÓN DE EQUIVALENCIA ESTRUCTURAL CON RESPECTO AL ESTÁNDAR	35
4.1.3	DESCRIPCIÓN DE LAS CARGAS	39
4.1.4	RESULTADOS	42

4.1.5	PRIMERA MODIFICACIÓN	45
4.1.6	SECCIONES CRÍTICAS	46
4.2	ESTUDIO DE CHASIS COMBINADO DE ACERO Y ALUMINIO	54
4.2.1	VERSIÓN PRIMERA	54
4.2.2	VERSIÓN SEGUNDA	56
4.3	ESTUDIO DE CHASIS MIXTO DE ACERO Y FIBRA DE CARBONO	66
4.3.1	DEPENDENCIA CON EL NÚMERO DE LÁMINAS	67
4.3.2	DEPENDENCIA DEL NÚMERO DE ELEMENTOS DE ACERO	71
4.3.3	CONFIGURACIÓN FINAL	75
5	<u>ESTIMACIÓN DE COSTES</u>	78
5.1	COSTE DEL CHASIS DE ACERO	78
5.2	COSTE DEL CHASIS COMBINADO DE ALUMINIO Y ACERO	79
5.3	COSTE DEL CHASIS MIXTO DE FIBRA DE CARBONO Y ACERO	80
6	<u>COMPARATIVA DE RESULTADOS</u>	82
6.1	COMPARATIVA DE MODELOS	82
6.2	COMPARATIVA EN FUNCIÓN DE LA VARIACIÓN DE LAS SECCIONES	86
6.3	TENSIONES MÁXIMAS SOPORTADAS	87
7	<u>CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS</u>	89
	<u>REFERENCIAS</u>	91
	<u>ANEXOS</u>	XCIII
	<u>ANEXO 1: “KEYWORD” LS-DYNA DEL MODELO DE ACERO</u>	XCIV
	<u>ANEXO 2: “KEYWORD” LS-DYNA DEL MODELO DE ACERO/ALUMINIO</u>	C
	<u>ANEXO 3: “KEYWORD” LS-DYNA DEL MODELO DE ACERO-FIBRA DE CARBONO</u>	CVI
	<u>ANEXO 4: PRESENTACIÓN</u>	CXIII

Índice de imágenes

<i>Imagen 1. Tipos de aleaciones de aluminio y sus denominaciones</i>	5
<i>Imagen 2. Sistema de laminado manual</i>	8
<i>Imagen 3. Proceso de fabricación de compuestos con saco de vacío y autoclave</i>	8
<i>Imagen 4. ET1, año 2008</i>	10
<i>Imagen 5. ET2ev, evolución de la anterior ET2 (no mostrada), año 2009</i>	11
<i>Imagen 6. ET3, año 2010</i>	11
<i>Imagen 7. ET4, año 2011</i>	12
<i>Imagen 8. ET5, año 2012</i>	12
<i>Imagen 9. Mallado Lagrangiano</i>	15
<i>Imagen 10. Chasis de fibra de carbono de un fórmula SAE</i>	18
<i>Imagen 11. Ejemplo de utilización de distintas geometrías de tubos en el chasis.</i>	19
<i>Imagen 12. Chasis del vehículo de fórmula SAE "ET3"</i>	20
<i>Imagen 13. Chasis del vehículo de fórmula SAE "ET4"</i>	21
<i>Imagen 14. Momento torsor aplicado al chasis.</i>	21
<i>Imagen 15. Representación del piloto</i>	25
<i>Imagen 16. Croquis de disposición de los arcos de seguridad</i>	27
<i>Imagen 17. Estructura de seguridad lateral</i>	30
<i>Imagen 18. Diseño geométrico del chasis de ET4</i>	34
<i>Imagen 19. Descripción de la parte frontal de la estructura</i>	38
<i>Imagen 20. Modelo de chasis ET4 con suspensión y ruedas</i>	39
<i>Imagen 21. Restricciones al movimiento en el eje posterior</i>	40
<i>Imagen 22. Puntos de aplicación de las cargas</i>	41
<i>Imagen 23. Fuerza aplicada en función del tiempo</i>	41
<i>Imagen 24. Representación del desplazamiento de la estructura</i>	42
<i>Imagen 25. Elementos primeros en plastificar</i>	43
<i>Imagen 26. Representación del Momento torsor frente al Giro de la estructura inicial</i>	44
<i>Imagen 27. Geometría del chasis tras la primera modificación</i>	45
<i>Imagen 28. Representación del Momento torsor frente al Giro tras la modificación</i>	46
<i>Imagen 29. Variación de la rigidez torsional en función del espesor en la sección 1</i>	47
<i>Imagen 30. Variación del peso del chasis en función del espesor en la sección 1</i>	48

<i>Imagen 31. Variación de la rigidez torsional en función del espesor en la sección 2</i>	49
<i>Imagen 32. Variación del peso del chasis en función del espesor en la sección 2</i>	49
<i>Imagen 33. Variación de la rigidez torsional en función del espesor en la sección 3</i>	50
<i>Imagen 34. Variación del peso del chasis en función del espesor en la sección 3</i>	51
<i>Imagen 35. Variación de la rigidez torsional en función del espesor en la sección 3</i>	51
<i>Imagen 36. Variación del peso del chasis en función del espesor en la sección 4</i>	52
<i>Imagen 37. Variación de la rigidez torsional en función del espesor en la sección 3</i>	53
<i>Imagen 38. Variación del peso del chasis en función del espesor en la sección 4</i>	53
<i>Imagen 39. Geometría del chasis acero-aluminio</i>	54
<i>Imagen 40. Representación del Momento torsor frente al Giro de la primera versión con aluminio</i>	55
<i>Imagen 41. Dimensiones geométricas normalizadas para tubos de aluminio</i>	57
<i>Imagen 42. Dimensiones geométricas del tubo de acero estándar</i>	58
<i>Imagen 43. Dimensiones geométricas mínimas del tubo de acero estándar</i>	62
<i>Imagen 44. Diseño geométrico del chasis de ET4</i>	65
<i>Imagen 45. Representación del Momento torsor frente al Giro de la segunda versión con aluminio</i>	66
<i>Imagen 46. Chasis combinado de acero y fibra de carbono</i>	68
<i>Imagen 47. Estructura de acero</i>	68
<i>Imagen 48. Representación de la relación entre la rigidez y el número de láminas</i>	69
<i>Imagen 49. Representación de la relación entre el peso del chasis y el número de láminas</i>	70
<i>Imagen 50. Representación de la relación entre la rigidez y el peso de la estructura</i>	70
<i>Imagen 51. Representación de las secciones más comprometidas</i>	71
<i>Imagen 52. Configuración 1</i>	72
<i>Imagen 53. Configuración 2</i>	72
<i>Imagen 54. Configuración 3</i>	73
<i>Imagen 55. Configuración 4</i>	73
<i>Imagen 56. Configuración 5</i>	74
<i>Imagen 57. Configuración 6</i>	74
<i>Imagen 58. Configuración final</i>	75
<i>Imagen 59. Elementos de acero en el chasis</i>	76
<i>Imagen 60. Relación entre el momento torsor del chasis mixto de acero-fibra de carbono y el giro experimentado</i>	77
<i>Imagen 61. Rigidez de cada uno de los modelos</i>	82
<i>Imagen 62. Peso de cada uno de los modelos</i>	83
<i>Imagen 63. Coste estimado de fabricación de cada uno de los modelos</i>	83

<i>Imagen 64. Relación Rigidez/Peso y Rigidez/Coste de cada modelo</i>	84
<i>Imagen 65. Relación entra la variación de la rigidez y la variación del peso</i>	86
<i>Imagen 66. Tensiones máximas soportadas</i>	88

Capítulo 1

Introducción

Una de las pieza más fundamentales en un vehículo es el chasis. Éste actúa como esqueleto del automóvil, soportando el peso y aportando solidez al conjunto, garantizando la manejabilidad del vehículo.

El monoplaza estará sometido a varias sollicitaciones, que inducen varias cargas sobre la estructura:

- Tensión estática debido al peso.
- Tensión estática debida a la rugosidad de la calzada.
- Tensión dinámica debida a dicha rugosidad.
- Tensión dinámica debida a fuerzas longitudinales debidas a esfuerzos de tracción y/o frenado.
- Tensión dinámica debida a fuerzas laterales originadas por la inscripción de una curva y/o viento lateral.
- Tensión dinámica debida a fuerzas verticales como consecuencia de baches y/o ondulaciones en la calzada.

Se ha comprobado experimentalmente que las tensiones debidas a la torsión predominan frente a las producidas por flexión, por lo que en el presente documento se estudiará la torsión debida al desplazamiento vertical relativo entre las ruedas de un eje.

1.1 Motivación y objetivos

En el mundo de la ingeniería de la competición, la competitividad es el factor más importante. Por ello, el ingeniero está obligado a alcanzar un elevado nivel de competitividad a través de cualquier medio que se encuentre a su alcance, sin comprometer el presupuesto o la seguridad.

La fórmula SAE, en la que escasean los medios, y abunda el ingenio, no es una excepción. Estudiantes de ingeniería se dedican a estudiar las distintas opciones para conseguir el mejor prototipo de automóvil con el que competir contra otros equipos de estudiantes de otras universidades. En la Università di Pisa (Italia), el equipo de fórmula SAE, constituido por estudiantes aficionados al automovilismo, elaboran cada año un nuevo monoplaça, introduciendo nuevas configuraciones, materiales, piezas y diseños persiguiendo la meta de alcanzar una posición elevada en el ranking. Para este equipo, el uso de nuevos materiales, como el aluminio o los materiales compuestos es el siguiente paso lógico para conseguir una elevada competitividad.

El objetivo de este proyecto es mejorar la actual forma constructiva para conseguir una sustancial mejora de las propiedades del chasis en términos de:

- Minimización de la masa y las dimensiones.
- Maximización de la relación rigidez a torsión/masa.

En el presente proyecto se realizará una comparativa entre las propiedades del acero, el aluminio y la fibra de carbono en diferentes elementos, basándose en el método de elementos finitos, para definir la viabilidad del uso de este último a la hora de realizar el chasis del monoplaça. Se evaluarán los resultados en términos de resistencia y peso, de modo que cumplan el reglamento de la SAE, establecidos para garantizar la seguridad, y, finalmente, en términos de coste. El objetivo

final es obtener un chasis resistente, ligero, seguro y económicamente viable, que sirva como base del desarrollo del resto de los elementos del monoplaza.

1.2 Acero

El acero es un material muy versátil, ya que es fácil de manipular, presenta propiedades excelentes y, además, resulta muy económico. Por ello, la industria automovilística se ha servido de éste para varias aplicaciones.

El acero es una aleación de hierro con carbono en una proporción que oscila entre 0,03 y 2%. Se suele componer de otros elementos, ya inmersos en el material del que se obtienen. Se le pueden añadir otros materiales para mejorar su dureza, maleabilidad u otras propiedades.

Los aceros se clasifican en cinco grupos principales: aceros al carbono, aceros aleados, aceros de baja aleación ultrarresistentes, aceros inoxidables y aceros de herramientas.

Aceros al carbono

El 90% de los aceros son aceros al carbono. Estos aceros contienen una cantidad diversa de carbono, menos de un 1,65% de manganeso, un 0,6% de silicio y un 0,6% de cobre. Con este tipo de acero se fabrican maquinas, carrocerías de automóvil, estructuras de construcción, etc.

Aceros aleados

Estos aceros están compuestos por una proporción determinada de vanadio, molibdeno y otros elementos; además de cantidades mayores de manganeso, silicio y cobre que los aceros al carbono. Estos aceros se emplean para fabricar engranajes, ejes, cuchillos, etc.

Aceros de baja aleación ultrarresistentes

Es la familia de aceros más reciente de las cinco. Estos aceros son más baratos que los aceros convencionales debido a que contienen menor cantidad de materiales costosos de aleación. Sin embargo, se les da un tratamiento especial que hace que su resistencia sea mucho mayor que la del acero al carbono. Este material se emplea para la fabricación de vagones y de estructuras de edificios y automóviles.

Aceros inoxidable

Este tipo de aceros contiene cromo, níquel, y otros elementos de aleación que los mantiene brillantes y resistentes a la oxidación. Algunos aceros inoxidable son muy duros y otros muy resistentes, manteniendo esa resistencia durante mucho tiempo a temperaturas extremas. Debido a su brillo, los arquitectos lo emplean mucho con fines decorativos. También se emplean mucho para tuberías, depósitos de petróleo y productos químicos, para la fabricación de instrumentos quirúrgicos o sustitución de huesos, y de útiles de cocina.

Aceros de herramientas

Estos aceros se emplean para fabricar herramientas y cabezales de corte y modelado de maquinas. Contiene wolframio, molibdeno y otros elementos de aleación que le proporcionan una alta resistencia, dureza y durabilidad.

1.3 Aluminio

La industria del automóvil está especializada en el ahorro de combustible y en la reducción de peso así como en aumentar la seguridad a través de las mejoras de resistencia perseguidas. Debido a las distintas propiedades del acero y del aluminio, gracias a una unión perfecta, se

CAPITULO 1: INTRODUCCION

pueden conseguir propiedades de uso adecuadas a la necesidad. Por ejemplo, disminuir el peso en la parte superior del automóvil utilizando aluminio en lugar de acero, además de reducir el peso, conseguiría descender el centro de gravedad del vehículo, mejorando la manejabilidad en la conducción.

Existen en la industria muchos tipos de aluminios, en función de sus aleaciones. Materiales como el cobre, el zinc o el magnesio, entre otros, se utilizan en combinación para mejorar sus características. En la imagen siguiente se describen las diferentes aleaciones y sus denominaciones comerciales.

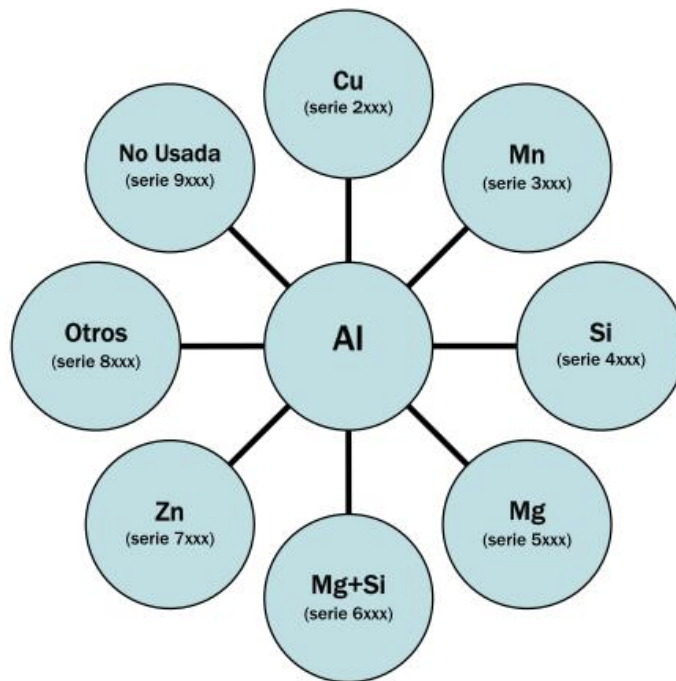


Imagen 1. Tipos de aleaciones de aluminio y sus denominaciones

Para el modelo combinado de acero-aluminio, se ha escogido por sus características, un aluminio de la serie 5XXX. Esta serie usa como principal elemento aleante el magnesio y a veces también se añaden pequeñas cantidades de manganeso cuyo objetivo es el de endurecer el aluminio. Las principales características de estas aleaciones son una media a alta

dureza por endurecimiento por deformación, buena soldabilidad, buena resistencia a la corrosión en ambientes marino y una baja capacidad de trabajo en frío. Estas características hacen que estas aleaciones se usen para adornos decorativos, ornamentales y arquitectónicos, en el hogar, iluminación de las calles y carreteras, botes, barcos y tanques criogénicos, partes de puentes grúa y estructuras de automóviles.

1.4 Materiales compuestos

El uso hoy en día de los materiales compuestos en la industria automovilística es una realidad cada vez más habitual. Estos materiales ofrecen multitud de posibilidades, dependiendo de la combinación de fibras y matrices que se empleen, pero, en general, ofrecen ciertas ventajas frente a los materiales estructurales tradicionales del sector:

- Presentan una densidad muy baja.
- Gran resistencia a la corrosión.
- Eliminación de la mecanización.
- Máxima temperatura de tratamiento: 180 °C.
- Coeficiente de expansión térmica casi 0.
- Dirección de la fibra orientable según necesidades de carga-tensión.
- Alta resistencia al daño a fatiga.

En la tabla 1 se puede ver una comparativa de las propiedades de algunos materiales, tanto tradicionales como compuestos, en la que se puede observar, por ejemplo, que la fibra de carbono ofrece una resistencia y rigidez del mismo orden que la del acero, pero con un peso cinco veces menor.

Sin embargo, el uso de materiales compuestos también ofrece algunas desventajas, entre las que destacan el elevado precio y su especial

CAPITULO 1: INTRODUCCION

manufacturación, por lo que en cada caso hay que evaluar si es rentable e idóneo el uso de materiales compuestos.

Typical Properties of Some Engineering Materials

Material	Density (ρ) (g/cc)	Tensile Modulus (E) (GPa)	Tensile Strength (σ) (GPa)	Specific Modulus (E/ ρ)	Specific Strength (σ/ρ)	Max. Service Temp. (°C)
Metals						
Cast iron, grade 20	7.0	100	0.14	14.3	0.02	230–300
Steel, AISI 1045 hot rolled	7.8	205	0.57	26.3	0.073	500–650
Aluminum 2024-T4	2.7	73	0.45	27.0	0.17	150–250
Aluminum 6061-T6	2.7	69	0.27	25.5	0.10	150–250
Plastics						
Nylon 6/6	1.15	2.9	0.082	2.52	0.071	75–100
Polypropylene	0.9	1.4	0.033	1.55	0.037	50–80
Epoxy	1.25	3.5	0.069	2.8	0.055	80–215
Phenolic	1.35	3.0	0.006	2.22	0.004	70–120
Ceramics						
Alumina	3.8	350	0.17	92.1	0.045	1425–1540
MgO	3.6	205	0.06	56.9	0.017	900–1000
Short fiber composites						
Glass-filled epoxy (35%)	1.90	25	0.30	8.26	0.16	80–200
Glass-filled polyester (35%)	2.00	15.7	0.13	7.25	0.065	80–125
Glass-filled nylon (35%)	1.62	14.5	0.20	8.95	0.12	75–110
Glass-filled nylon (60%)	1.95	21.8	0.29	11.18	0.149	75–110
Unidirectional composites						
S-glass/epoxy (45%)	1.81	39.5	0.87	21.8	0.48	80–215
Carbon/epoxy (61%)	1.59	142	1.73	89.3	1.08	80–215
Kevlar/epoxy (53%)	1.35	63.6	1.1	47.1	0.81	80–215

Tabla 1. Comparativa de propiedades de diferentes materiales

En cuanto a los procesos tecnológicos para la fabricación de piezas de fibra de carbono, éstos pueden realizarse en molde abierto o molde cerrado. Debido a las limitaciones que supone realizar el proceso por un equipo de estudiantes sin útiles adecuados, los procesos que se podrán utilizar se detallan a continuación:

1. Método de contacto manual (Hand-lay up): Se extienden capas de resina y tejido de fibra de carbono alternas sobre un molde, pasando un rodillo para evitar imperfecciones, hasta

CAPITULO 1: INTRODUCCION

llegar al espesor deseado, y se deja curar la resina, a la que se le agrega un catalizador.

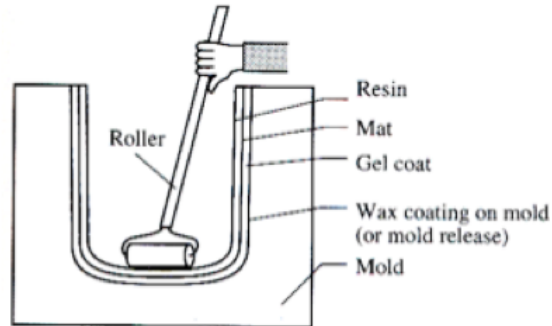


Imagen 2. Sistema de laminado manual

2. Saco de vacío y de presión autoclave: Se impregnan capas de fibras, normalmente láminas unidireccionales con resina y se curan parcialmente para formar un pre-impregnado. Las láminas pre-peg se cubren con un saco flexible, y se consolidan usando otro de presión en autoclave a la temperatura de curado requerida. También es posible realizarlo sin un horno autoclave, aunque no da el mismo resultado.

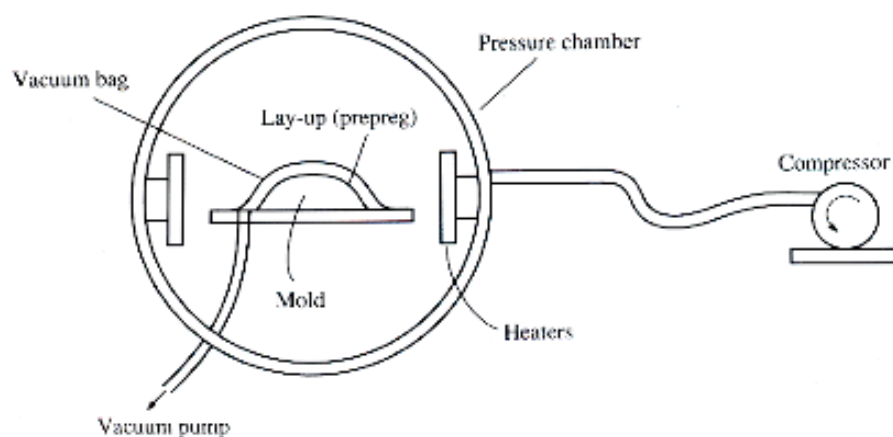


Imagen 3. Proceso de fabricación de compuestos con saco de vacío y autoclave

1.5 La fórmula SAE

La fórmula SAE es una competición de ingeniería para estudiantes organizada por SAE Internacional (acrónimo de Sociedad de Ingenieros de Automoción, en inglés). Empezó en 1979 con sólo unos pocos equipos participantes y ha ido creciendo hasta convertirse en un evento internacional con cientos de equipos en todo el mundo. Se realizan competiciones en Estados Unidos, Alemania, Italia, Hungría, Brasil y Australia.

Los estudiantes diseñan y construyen un monoplaza con el que compiten con otros equipos. El ganador de la competición no es exclusivamente el equipo con el coche más rápido, sino que es el equipo que tiene el mejor conjunto de construcción, funcionamiento y plan financiero. Es decir, el coche debe demostrar buenas características de conducción, como aceleración, frenada y manejo, con un coste razonable y con una elevada fiabilidad. Por supuesto, como si de un mercado se tratase, factores como estética, confort y el uso de elementos accesibles y estandarizados, añaden valor al vehículo. Todo ello debe realizarse siguiendo unos criterios establecidos.

El jurado está compuesto por expertos de la competición, del automovilismo y de la industria.

Cada una de las competiciones tiene sus propias pruebas y disciplinas. El equipo de la Università di Pisa compite, tradicionalmente, en dos competiciones, "Formula Student Germany" y "Formula Student Italy (ATA)".

1.5.1 E-Team: Pisa University's racing team

El E-Team es el equipo de carreras que representa a la Università di Pisa en las competiciones de Alemania y Varano.

El equipo está constituido enteramente por estudiantes bajo la supervisión del profesor Massimo Guiggiani.



El equipo, fundado en 2007, ha realizado varios modelos de monoplazas, denominados con las letras ET, provenientes de la palabra turca ETKEN, que engloba en su significado los adjetivos activo, efectivo, dominante y determinante, filosofía del equipo; y un número, que corresponde al número de versión del monoplaza. En 2008 compitió por primera vez con el ET1, con excelentes resultados. El último monoplaza, compitiendo en 2012, corresponde al ET5. En las imágenes se pueden cada uno de ellos.



Imagen 4. ET1, año 2008

CAPITULO 1: INTRODUCCION



Imagen 5. ET2ev, evolución de la anterior ET2 (no mostrada), año 2009



Imagen 6. ET3, año 2010



Imagen 7. ET4, año 2011



Imagen 8. ET5, año 2012

1.6 Método de elementos finitos

El método de los elementos finitos (MEF en castellano o FEM en inglés), MEF de ahora en adelante, es un método de cálculo numérico por iteraciones sucesivas para la resolución de ecuaciones en derivadas parciales.

CAPITULO 1: INTRODUCCION

La idea general del MEF es la división de un continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo regirán también el del elemento. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), que es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no.

El MEF, por tanto, se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado. Esta transformación se denomina discretización del modelo. El conocimiento de lo que sucede en el interior de este modelo del cuerpo aproximado, se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos. Es por tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos.

Se utilizará esta metodología ya que nos permite comprender de mejor manera las estructuras y sus deformaciones, permitiéndonos posteriormente su optimización, mediante:

- El estudio de nuevas configuraciones que sin esta técnica serían inviables.
- Descartando modelos que de otra manera solo podríamos descartar mediante la experimentación.
- Reduciendo por tanto el número de experimentos, ahorrando en la investigación.
- Permite aumentar la robustez y la calidad de los diseños experimentales, reduciendo fallos.

Se pueden usar dos modelos de cálculo: modelos en 2D y en 3D. Mientras los modelos en 2D conservan la simplicidad y permiten que el análisis se realice en un ordenador de uso personal, tiende a dar

resultados menos precisos. El modelado en 3D, sin embargo, produce resultados más precisos mientras sacrifica la habilidad para funcionar de manera efectiva en un ordenador personal de uso cotidiano y deberá llevarse a cabo en servidores de cálculo específicos. Con cada uno de estos esquemas modelados, el programador puede insertar numerosos algoritmos ó funciones que pueden hacer al sistema comportarse de manera lineal o no lineal. Los sistemas lineales son menos complejos y normalmente no tienen en cuenta deformaciones plásticas. Los sistemas no lineales toman en cuenta las deformaciones plásticas, y algunos, incluso, son capaces de simular el material hasta la fractura.

La malla, utilizada por el MEF, esta programada para contener el material y las propiedades de la estructura que definen cómo ésta reaccionará ante ciertas condiciones de carga. Las regiones que se estiman que recibirán gran cantidad de tensión tienen normalmente una mayor densidad de nodos (densidad de malla) que aquellos que experimentan poco o ninguno. Los puntos de interés consisten en: puntos de contacto en el impacto de los materiales, esquinas, detalles complejos, y áreas de elevada tensión. La malla actúa como la red de una araña en la que desde cada nodo se extiende un elemento de malla a cada nodo adyacente. Este tipo de red vectorial es la que lleva las propiedades del material al objeto, creando varios elementos.

En cuanto a los métodos numéricos de integración, en este proyecto se ha utilizado el “Método Lagrangiano”. En este tipo de formulación de la malla, un elemento finito representa la misma parte de material a lo largo de todo el análisis, el mallado seguirá los movimientos del material. Se deben definir adecuadamente las propiedades del material para simular el fluido. Para ilustrar el funcionamiento de este tipo de malla se puede observar la imagen siguiente en la cual las fuerzas son aplicadas tan solo al nodo central, el resultado de las cargas es el desplazamiento del nodo. Este nodo toma una nueva posición y la malla se deforma.

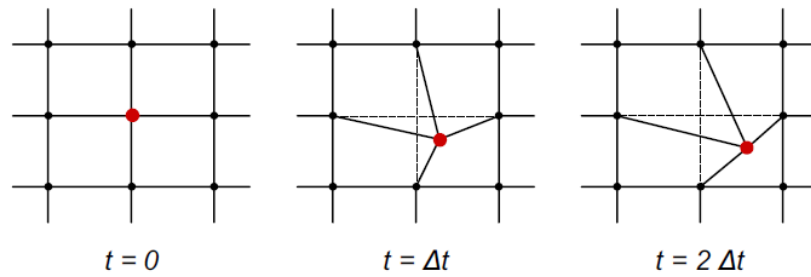


Imagen 9. Mallado Lagrangiano

El software utilizado es el LS-Prepost, para la modelización, pre-procesado y post-procesado, y el LS-Dyna para el procesamiento y análisis de la estructura.

El programa LS-Prepost se ha utilizado para la construcción del modelo. Dicho programa utiliza un sistema de estructuración en “tarjetas” con las que: se identifican entidades y agrupaciones de entidades (*NODE, *ELEMENT_MASS, *SET, etc.), se definen características y propiedades de entidades (*MAT, *PROP) y se marcan asociaciones entre ellas (*CONTACT_AUTOMATIC, etc.).

LS-DYNA es un código de elementos finitos multipropósito que analiza grandes deformaciones de problemas estáticos o dinámicos de estructuras incluyendo su interacción con fluidos. Algunas de sus características más generales se indican a continuación:

- El método está basado en integración explícita.
- Un algoritmo de impacto y contacto permite tratar problemas complejos de la realidad, incluyendo transferencia de calor a través de las superficies en contacto.
- La especialización del algoritmo de contacto hace que no sea necesario mallar las zonas de transición para obtener resultados fiables.
- Ofrece una gran variedad de formulaciones para cada elemento.

- Gran especialización en la industria del automóvil. Airbags, cinturones de seguridad y sensores son un ejemplo de ello.
- Para elementos bidimensionales es capaz de refinar la malla durante el procesado en función de los resultados para obtener así mayor precisión en las zonas que la requieran.
- Aproximadamente 100 modelos y 10 ecuaciones de estado abarcan un amplísimo rango de comportamiento material.

1.7 Estructura de la memoria

Esta memoria está formada por 5 capítulos, cada uno de los cuales aborda el problema de manera complementaria al resto.

El primero de ellos, el presente capítulo, realiza una breve introducción al problema que nos ocupa, describiendo el entorno bajo el cuál ha surgido el proyecto.

El siguiente capítulo, el capítulo 2 presenta los antecedentes del proyecto, basándose en el desarrollo de estructuras de vehículos de competición.

A lo largo del capítulo tercero se describen los requerimientos de la norma en cuanto al chasis.

El cuarto capítulo muestra un modelo de chasis de acero, dos modelos combinados de aluminio y acero, y otro mixto de acero y fibra de carbono, de manera que, mediante el análisis de los resultados de cada uno de ellos, se podrá llegar a una conclusión.

La estimación de costes de cada una de las configuraciones constituye el quinto capítulo.

El capítulo sexto realiza una comparativa de los resultados obtenidos, en términos de rigidez, peso y coste.

CAPITULO 1: INTRODUCCION

Finalmente, las conclusiones del estudio se exponen en el capítulo séptimo, analizando los resultados obtenidos en los apartados anteriores.

En el anexo se adjuntan los códigos de las simulaciones llevadas a cabo.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1 Chasis en la fórmula SAE

En las competiciones de fórmula SAE, se encuentran diversos tipos de chasis. Las universidades que disponen de un presupuesto alto y que cuentan con una experiencia de varios años en competición optan en algunos casos por el monocasco de fibra de carbono. De todos modos, este tipo de chasis tiene una participación minoritaria en los monoplazas de esta competición.



Imagen 10. Chasis de fibra de carbono de un fórmula SAE

Los equipos que tienen los recursos económicos y técnicos necesarios para fabricar este tipo de chasis tienen la ventaja de obtener una estructura muy resistente y con un comportamiento excelente en pista, ya que este tipo de estructuras ofrecen gran resistencia a torsión y su peso es menor que el de las estructuras de acero.

Por otro lado las estructuras más comunes en la fórmula SAE son las tubulares de acero, este tipo de estructuras ofrecen una buena respuesta a los esfuerzos aunque su principal inconveniente es el aumento del peso respecto a las anteriores con la ventaja de un coste mucho más reducido.

Aunque la mayoría de los grupos se dedican al estudio de un chasis tubular en cuanto a la disposición y geometría de materiales, hay algunos equipos que han ido más allá utilizando tubos de secciones variadas, cuadradas, circulares y en algunos casos chapas enfrentadas rellenas de ciertos materiales para conseguir siempre el mismo objetivo, mayor rigidez a torsión con el menor peso y coste posible.

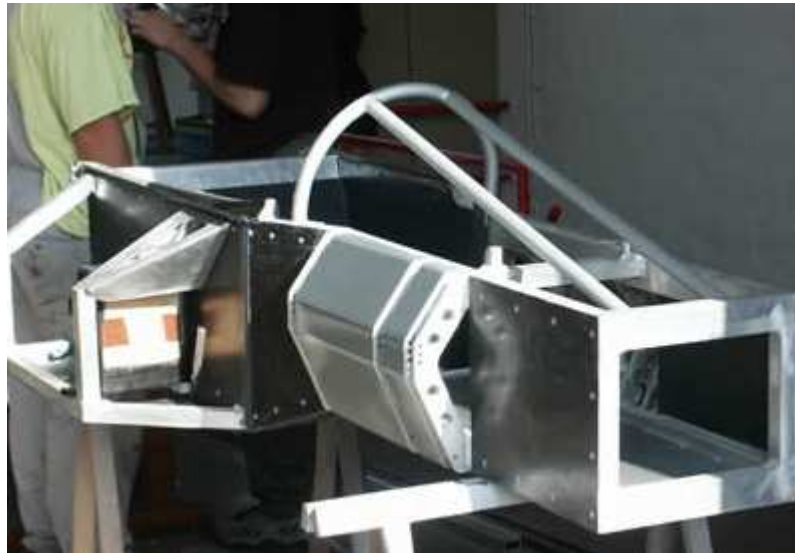


Imagen 11. Ejemplo de utilización de distintas geometrías de tubos en el chasis.

2.2 Chasis en el E-Team, University of Pisa

2.2.1 Chasis realizado en acero

El equipo de competición de la Università di Pisa, como ya se ha mencionado, hasta ahora sólo ha diseñado y construido el chasis de los

monoplazas en acero, reservando el aluminio para aplicaciones como el atenuador de impactos y la fibra de carbono en las últimas versiones para la carrocería y algunos elementos de la suspensión.

Con el objetivo de cumplir la normativa de la FSAE, todos los años cada equipo debe realizar algunos ajustes al chasis. La versión del chasis anterior al que se estudia en el presente documento es el del ET3, la versión de 2010, cuya masa es de 30 kg, y la rigidez a torsión de 2630 N·m/°.

Puesto que el chasis del ET3 dio muy buenos resultados se ha decidido mejorar sólo algunos aspectos como:

- Alargar la parte trasera, debido a un nuevo diseño de suspensión trasera.
- Añadir algunos tubos auxiliares intermedios, ganando peso pero aumentando la rigidez.
- Añadir un mecanismo de unión con el diferencial.

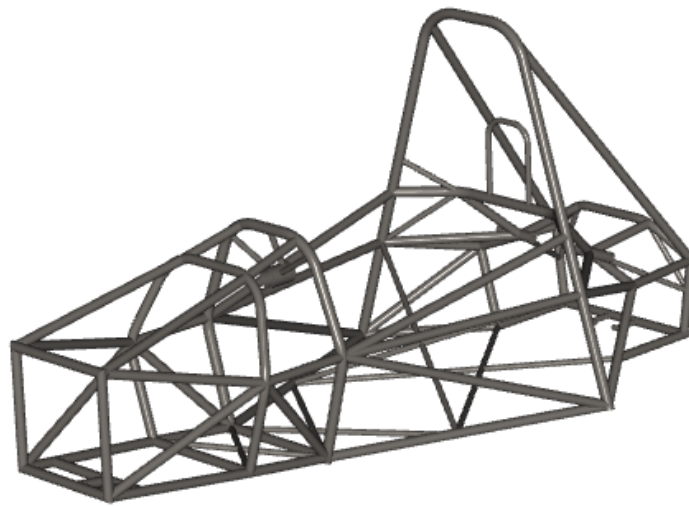


Imagen 12. Chasis del vehículo de fórmula SAE "ET3"

La imagen muestra un esquema del chasis del ET4, es decir, el monoplaza que ha competido en 2011.

CAPITULO 2: ANTECEDENTES

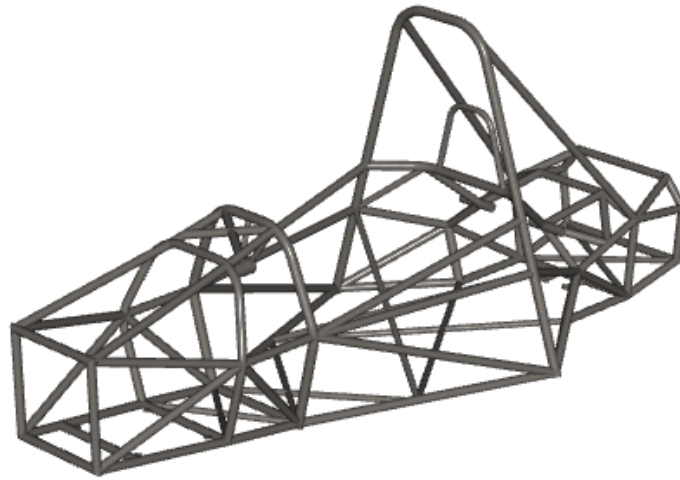


Imagen 13. Chasis del vehículo de fórmula SAE "ET4"

Para realizar el análisis torsional se aplica un momento torsor a toda la estructura, tal y como muestra la imagen, de modo que se mide el giro relativo de la parte anterior y posterior.

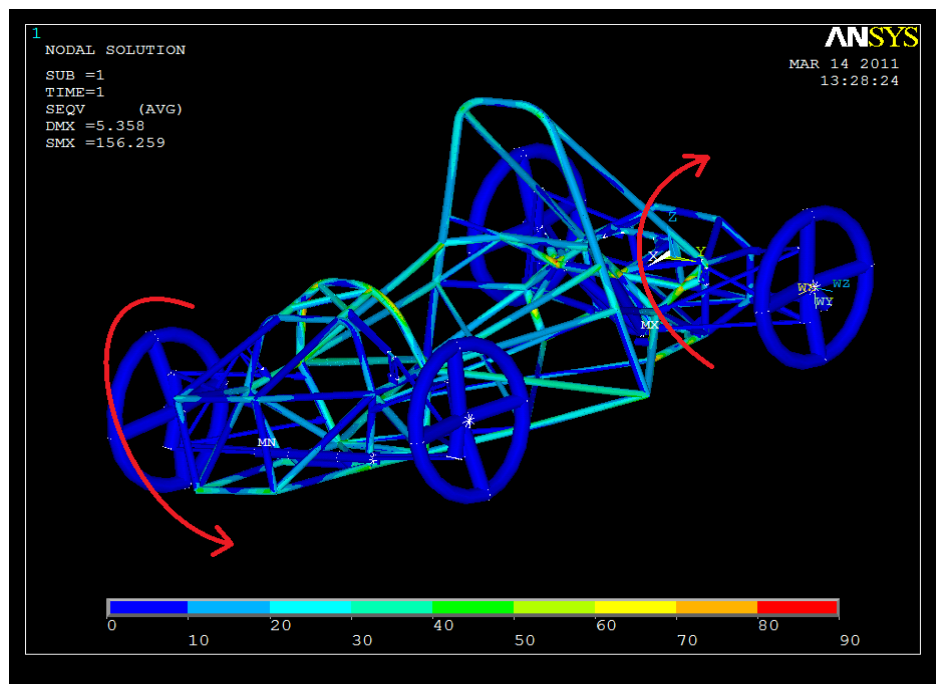


Imagen 14. Momento torsor aplicado al chasis.

CAPITULO 2: ANTECEDENTES

Los resultados que se obtuvieron tras el ensayo experimental de este monoplaza fueron, para una masa de 33 kg, una rigidez torsional de 2950 N·m/°.

Resumiendo, los resultados experimentales de ambos chasis se reflejan en la siguiente tabla:

Versión del chasis	Masa (kg)	Rigidez torsional (N·m/°)
ET3	30	2630
ET4	33	2950

Tabla 2. Resultados experimentales de las versiones anteriores de chasis

Capítulo 3

Normativa SAE referente al chasis

3.1 Introducción

Como en toda competición, en la fórmula SAE existen una serie de especificaciones que vienen dadas por parte de la organización. También hay cargas que derivan de las diferentes pruebas a las que el vehículo va a ser sometido, y que deben de tenerse en cuenta a la hora de abordar el problema de diseño del chasis. Estas cargas serán transmitidas al chasis por medio de los apoyos en los que se fijan las distintas partes que forman el coche.

3.2 Especificaciones de la organización

La organización requiere que:

- La distancia mínima entre ejes o batalla, será de 1525 mm (midiendo esa distancia desde el centro del contacto de la rueda delantera con el suelo, al centro del contacto de la rueda trasera con el suelo, con las ruedas delanteras rectas).
- La vía (distancia entre ruedas del mismo eje) del vehículo más pequeña, no ha de ser en ningún caso inferior al 75% de la vía mayor.

- La distancia al suelo de la parte inferior del chasis ha de ser la suficiente para no contactar en ningún momento con la pista, o partes de ella (pianos...). Para ello se deberá tener en cuenta que las ruedas han de ser de un diámetro superior a 203.21 mm (esta medida no tiene en cuenta el neumático).

- En la parte posterior del coche se debe facilitar un punto de enganche que debe soportar el peso del vehículo. Debe estar orientado perpendicularmente a la línea longitudinal del vehículo, y debe ser horizontal. Debe ser de forma tubular de un diámetro de 25.4 mm. La longitud debe ser mayor que 300 mm, y la altura mínima al suelo debe superar los 75mm medida desde la parte más baja del tubo de enganche. Por otro lado los 180° inferiores del tubo deben de estar descubiertos a lo largo de una distancia mínima de 280 mm. Esto es necesario para la sujeción y remolque del vehículo por parte de los jueces o empleados de pista en caso de ser necesario. En coordinación con la suspensión del vehículo, se debe tener en cuenta que a una altura de 200 mm medida desde el suelo al punto más bajo del enganche, las ruedas en rebote completo no deben tocar el suelo.

- El diseño se realizará para que sea válido para el piloto más alto del equipo y para un hombre elegido entre la población al azar en el 95% de los casos. La plantilla de este hombre en 2D viene dada por la organización (Figura 9). Un círculo de 300 mm representará la cabeza con el casco del piloto. Otro círculo de 200 mm representará los hombros y las cervicales. Otro de 200 mm es el que simulará las caderas. Una línea recta de 490 mm unirá los centros de los dos círculos de 200 mm, y una línea recta de 280 mm conectará los hombros con la cabeza y el casco. Este modelo debe estar situado en la posición normal de conducción, con la espalda en el respaldo, y con la cabeza a 25.4 mm del acolchado posterior al casco.

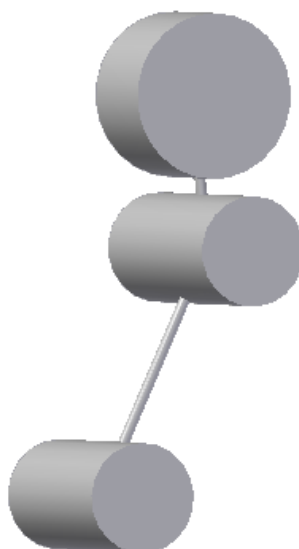


Imagen 15. Representación del piloto

3.3 Espesores de protecciones

La estructura principal del coche ha de ser construida de acero bajo en carbono o aleado, en tubos (mínimo 0.1% de carbono), con las dimensiones especificadas en la tabla 2.

Elemento o aplicación	Dimensión exterior x espesor
Arco principal y arco frontal. Barras de soporte de los hombros del piloto.	Tubos de sección circular de 25.4 mm x 2.40 mm ó Tubos de sección circular de 25.0 mm x 2.50 mm
Estructura protección contra impacto lateral, mampara de protección frontal, arco auxiliar delantero. Fijaciones del arnés de retención del conductor.	Tubos de sección circular de 25.4 mm x 1.65 mm ó Tubos de sección circular de 25.0 mm x 1.75 mm ó Tubos de sección circular de 25.4 mm x 1.60 mm ó Tubos de sección rectangular de 25.0 mm x 25.0 mm x 1.25 ó Tubo de sección rectangular de 26.0 mm x 26.0 mm x 1.2 mm
Soportes del mampara frontal y del los arcos principales y auxiliar.	Tubos de sección circular de 25.4 mm x 1.25 mm ó Tubo de sección circular de 25.0 mm x 1.50 mm ó Tubo de sección circular de 26.0 mm x 1.20 mm

Tabla 3. Espesores mínimos requeridos

El uso de aleaciones no permite utilizar un grosor de pared menor que el especificado para acero bajo en carbono.

También podrán ser utilizados otros materiales bajo las siguientes condiciones:

- Que la disposición de materiales alternativos adoptada tenga un E-I mayor o equivalente sobre el eje más débil.
- El arco principal y su apoyo deben estar hechos de acero.
- Los tubos de aluminio deben ser tratados térmicamente y endurecidos tras la soldadura. El equipo deberá presentar en este caso un informe del proceso.

3.4 Arcos de seguridad

La estructura de protección del piloto consta entre otras partes de dos arcos de seguridad, uno frontal justo anterior al volante de dirección, y otro (el principal) colocado detrás de la cabeza y espalda del piloto. La cabeza del conductor debe estar protegida del suelo en todo momento en caso de vuelco. Por ello teniendo en cuenta el piloto más alto, o el modelo de piloto que se ha dado anteriormente, en ningún caso debe quedar una distancia menor de 50.8 mm entre la parte superior del casco del piloto y la tangente a los dos arcos de seguridad (como se muestra en el croquis de la imagen:

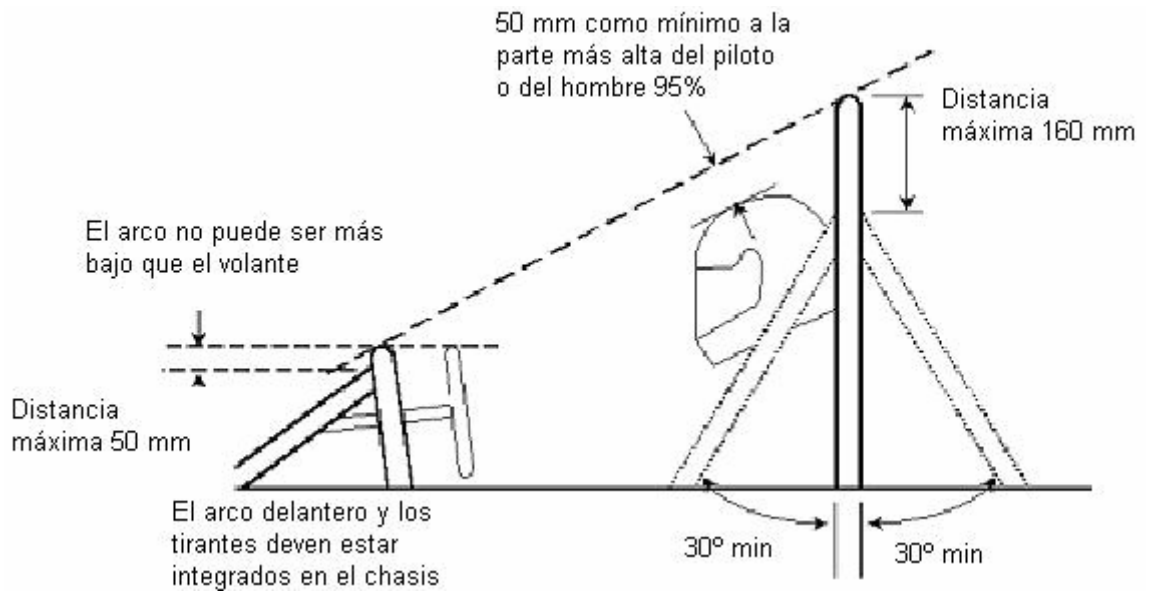


Imagen 16. Croquis de disposición de los arcos de seguridad

En la construcción se debe tener en cuenta que no puede haber fisuras u ondulaciones en los tubos de los arcos de seguridad. Por otra parte, las curvas en ellos, medidas en su línea central han de tener un radio mínimo de tres veces el diámetro exterior del tubo.

Arco principal

El arco principal debe estar construido de una sola pieza de acero de las características (espesor y diámetro) especificadas para tubos de acero anteriormente.

El arco principal debe prolongarse desde la parte más baja de un lado del chasis hasta la parte más baja del otro lado.

En una vista lateral del vehículo, la parte del arco principal que asoma por encima del punto de unión de éste con el chasis ha de tener una inclinación menor de 10° con la vertical.

En una vista frontal del vehículo, los miembros verticales del arco principal de seguridad, deben de estar al menos 38 mm separados del lugar en el que el arco principal se une con el resto del chasis.

Arco frontal

El arco frontal debe estar construido de acero de las mismas características dimensionales que el arco principal.

Por otro lado con un buen estudio, triangulación, y refuerzos, este arco no será obligatoriamente de una pieza.

El arco debe ir desde la parte más baja de un lado del chasis hasta la parte más baja del otro lado.

En ningún momento la parte más alta del arco frontal ha de ser más baja que la parte más alta del volante (en cualquier posición de éste).

En una vista lateral el arco frontal no podrá tener una inclinación mayor de 20º sobre la vertical.

Tirantes del arco principal

Deben ser construidos en acero de la sección antes mencionada en los dos arcos.

El arco principal debe ir reforzado con dos tirantes, hacia delante o hacia atrás, pero éstos no podrán estar al mismo lado al que se inclina (en caso de que se incline) el arco principal.

Los tirantes deben estar soldados a la parte más alta posible del arco principal, nunca en un lugar más bajo que 160 mm desde la parte superior del arco.

Los tirantes deben ser rectos.

Tirantes del arco delantero:

Los tirantes del arco frontal deben ser de la misma sección que los del arco principal.

Los tirantes han de proteger las piernas del conductor, por lo que deberán estar a ambos lados y han de llegar hasta la estructura de protección de los pies del piloto.

Han de ser soldados lo más cerca de la parte superior del arco posible, nunca más bajos de 50 mm (de la parte superior del arco).

3.5 Plano frontal encargado de proteger los pies del piloto

Por delante del plano frontal debe de haber un atenuador de impacto que absorba de energía.

El plano frontal debe estar construido con tubos de las mismas características geométricas que los usados para los arcos de seguridad.

Debe estar situado de tal forma que los pies del piloto (sin estar presionando los pedales) queden protegidos por él.

Como mínimo debe tener tirantes en la parte más alta (no más bajos de 50mm) hacia el arco frontal, así como en la parte más baja.

Debe estar sujeto, nodo a nodo, triangulando, con al menos una diagonal por lado.

3.6 Protección de impactos laterales

La protección lateral está formada al menos por tres piezas tubulares de sección igual a la de los arcos de seguridad.

Con un piloto de 77 kg sentado en el coche, la pieza más alta de la protección lateral, debe unir el arco frontal y el principal a una altura del suelo mayor de 300 mm y menor de 350 mm. En el caso de que hubiese otra pieza del chasis que cumpla estas características, podría ser utilizada como protección.

La pieza inferior de la protección lateral, debe conectar la base del arco frontal con la base del arco principal.

Con la adecuada triangulación y estudio es posible construir las piezas con más de un tubo.

Se deberá poner una diagonal que complete la protección como muestra el croquis de la imagen:

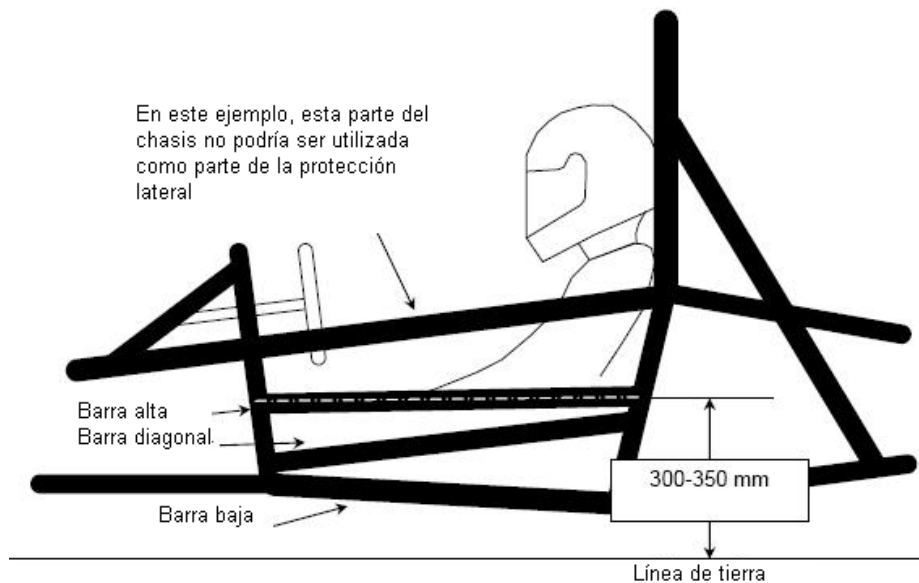


Imagen 17. Estructura de seguridad lateral

3.7 Otras consideraciones

En el caso de utilizar otros elementos, se deberá demostrar la equivalencia estructural con respecto a los estándares.

Geometrías y materiales alternativos

Se pueden utilizar geometrías y/o materiales alternativos excepto en el arco principal, en el arco frontal, y sus soportes, que deben ser de acero, es decir, el uso de aluminio, titanio o materiales compuestos para estas partes está prohibido.

CAPITULO 3: NORMATIVA SAE REFERENTE AL CHASIS

No se debe utilizar titanio o magnesio con soldaduras en ninguna parte de la estructura primaria.

Capítulo 4

Análisis numérico del chasis

Se van a estudiar tres casos. El primero de ellos es un chasis realizado enteramente en acero, partiendo del chasis ET4. El segundo caso, introduce algunos elementos en aluminio. Y, por último, se estudiará un modelo combinado de fibra de carbono y acero.

4.1 Estudio de chasis de acero

Se ha realizado una modelización con el programa LS-Prepost, del chasis de acero del ET4, a partir de los datos geométricos. Se han utilizado elementos tipo “Beam”, para reducir el tiempo de cálculo, con cuatro puntos de integración. El número de elementos total es de 132 para la estructura del chasis, 178 contando con las suspensiones y las ruedas. Todo ello se ha estudiado en el entorno elástico del material. Se ha realizado el análisis en modo implícito, de manera que se considera el ensayo cuasiestático, es decir, independiente del tiempo.

4.1.1 Descripción del modelo inicial

Si se diseña un chasis para la FSAE, éste debe cumplir algunos requisitos que se han descrito en el apartado 1.6 de este documento. En cuanto a los tubos, se recuerda que deben cumplir las siguientes dimensiones:

CAPITULO 4: ANÁLISIS NUMÉRICO DEL CHASIS

Elemento o aplicación	Dimensión exterior x espesor
Arco principal y arco frontal. Barras de soporte de los hombros del piloto.	Tubos de sección circular de 25.4 mm x 2.40 mm ó Tubos de sección circular de 25.0 mm x 2.50 mm
Estructura protección contra impacto lateral, mampara de protección frontal, arco auxiliar delantero. Fijaciones del arnés de retención del conductor.	Tubos de sección circular de 25.4 mm x 1.65 mm ó Tubos de sección circular de 25.0 mm x 1.75 mm ó Tubos de sección circular de 25.4 mm x 1.60 mm ó Tubos de sección rectangular de 25.0 mm x 25.0 mm x 1..25 ó Tubo de sección rectangular de 26.0 mm x 26.0 mm x 1.2 mm
Soportes del mampara frontal y del los arcos principales y auxiliar.	Tubos de sección circular de 25.4 mm x 1.25 mm ó Tubo de sección circular de 25.0 mm x 1.50 mm ó Tubo de sección circular de 26.0 mm x 1.20 mm

Si se quiere utilizar algún otro material y/o geometría se deberá demostrar su equivalencia estructural, tal y como explica el reglamento.

Para los elementos o aplicaciones no especificados en dicha tabla se pueden utilizar los materiales y geometrías que se consideren necesarios.

El chasis del ET4 está compuesto por cinco grupos de tubos circulares de distintas características geométricas. En la imagen siguiente, y según la tabla adjunta, se puede ver cómo queda la estructura por secciones. Todas ellas realizadas en acero AISI 4130.

Las propiedades mecánicas del acero AISI 4130 son:

- Densidad de 7.870 kg/m³.
- Módulo de elasticidad de 210 GPa.
- Coeficiente de Poisson de valor 0,3.
- Límite de elasticidad igual a 610 MPa.

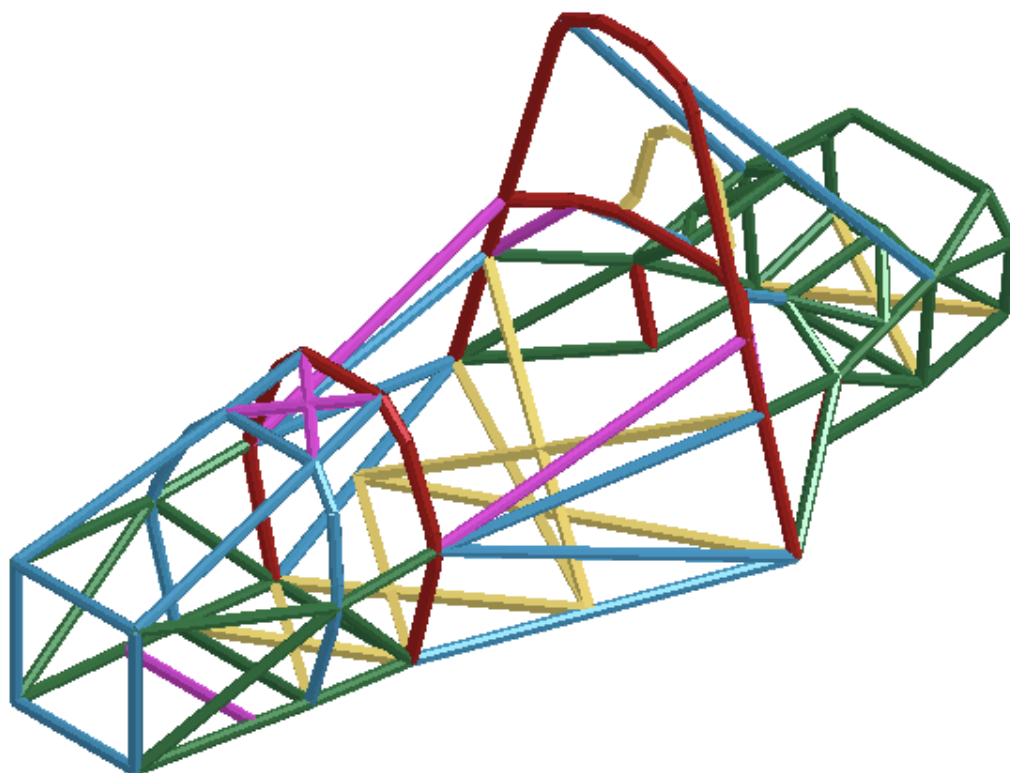


Imagen 18. Diseño geométrico del chasis de ET4

Color	Elemento o aplicación	Dimensión exterior x espesor
Sección 1	Arco principal y arco frontal. Barras de soporte de los hombros del piloto.	Tubos de sección circular de 28.575 mm x 4.22 mm
Sección 2	Estructura protección contra impacto lateral, mampara de protección frontal, arco auxiliar delantero. Fijaciones del arnés de retención del conductor.	Tubos de sección circular de 25.0 mm x 1.75 mm
Sección 3	Soportes del mampara frontal y del los arcos principales y auxiliar.	Tubos de sección circular de 25.0 mm x 1.50 mm
Sección 4	Estructura auxiliar principal.	Tubos de sección circular de 25.0 mm x 0.5 mm
Sección 5	Estructura auxiliar secundaria.	Tubo de sección circular de 19.0 mm x 1.0 mm

Se puede observar que el primer grupo de tubo no cumple la normativa, por lo que ha sido necesario la demostración de la equivalencia estructural con el estándar, tal y como se muestra en el siguiente apartado.

4.1.2 Demostración de equivalencia estructural con respecto al estándar

Descripción del elemento utilizado

El arco principal, el arco frontal y la barra de soporte de los hombros del piloto están realizados con un tubo de sección circular con las siguientes características:

- Material: AISI 4130 (Mat. nº 1.7214)
- Geometría de la sección: Diámetro exterior de 28,575 mm y diámetro interior de 24,358 mm.

En la siguiente tabla están las características del acero AISI 4130, comparadas con el material estándar requerido por la normativa SAE:

	AISI 4130	S235Jr
Límite de elasticidad R_p (MPa)	610	235
Resistencia última R_u (MPa)	746	360

Cálculos

Resistencia a tracción

La tensión, debida a una fuerza axial se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

Incluso si las propiedades del material son mayores que las mínimas del material requerido, el área S_A de la sección del tubo elegido debe ser mayor o igual al área mínima requerida S_B del elemento estándar, cuyos diámetros exterior e interior son de 25,4 mm y de 20,6 mm, respectivamente.

$$S_A = \frac{\pi \cdot (D_{ext}^2 - D_{int}^2)}{4} = \frac{\pi \cdot (28,575^2 - 24,358^2)}{4} = 175,29 mm^2$$

$$S_B = \frac{\pi \cdot (D_{ext}^2 - D_{int}^2)}{4} = \frac{\pi \cdot (25,4^2 - 20,6^2)}{4} = 173,42 mm^2$$

Por tanto, $S_A > S_B$. Esto significa que el acero AISI 4130 soporta una mayor fuerza axial con una sección S_A con respecto al S235Jr con una sección S_B .

Resistencia a flexión

La tensión producida debido a flexión se puede calcular del siguiente modo:

$$\sigma = \frac{M \cdot D_{out}}{2I}$$

Para demostrar la equivalencia a flexión, se debe cumplir que el momento de inercia respecto a un eje de la sección transversal I_A debe ser mayor o igual al momento de inercia de la sección mínima requerida I_B .

$$I_A = \frac{\pi \cdot (D_{ext}^4 - D_{int}^4)}{64} = \frac{\pi \cdot (28,575^4 - 24,358^4)}{64} = 15448 mm^4$$

$$I_B = \frac{\pi \cdot (D_{ext}^4 - D_{int}^4)}{64} = \frac{\pi \cdot (25,4^4 - 20,6^4)}{64} = 11592 mm^4$$

Considerando que:

$$\frac{I_A}{D_{extA}} = \frac{15448 mm^4}{28,575 mm} = 540,6 mm^3$$

$$\frac{I_B}{D_{extB}} = \frac{11592 mm^4}{25,4 mm} = 456,4 mm^3$$

Se llega a la conclusión de que:

$$\frac{I_A}{D_{extA}} > \frac{I_B}{D_{extB}}$$

Es decir, que el momento flector soportado por el acero AISI 4130 es mayor que el que soporta el estándar.

Resistencia a pandeo

La carga crítica a pandeo F_R se puede expresar de la siguiente manera:

$$F_R = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l^2}$$

Por lo que, para demostrar la equivalencia a pandeo, basta con demostrar que el momento de inercia I_A es mayor o igual a I_B , puesto que el módulo de elasticidad y la longitud son iguales en ambos casos.

Tal y como se ha demostrado en el apartado anterior, $I_A > I_B$.

Disipación de energía

Con el objeto de obtener la disipación de energía del frontal, se considera un impacto frontal. En este caso, se tienen las siguientes consideraciones:

- La energía cinética del impacto debe ser disipada por el “Impact attenuator” (atenuador de impactos), y por los soportes del mampara frontal. El propósito del mampara frontal es transferir la carga del impacto desde el atenuador a los soportes sin fallas bajo cargas impulsivas.
- Los tubos del mampara frontal y sus soportes deben cumplir los requerimientos de propiedades mínimos de la norma. Por tanto, considerando la equivalencia estructural del arco frontal tratada anteriormente, se puede afirmar que se cumplen los requerimientos mínimos necesarios con respecto a la disipación de energía.

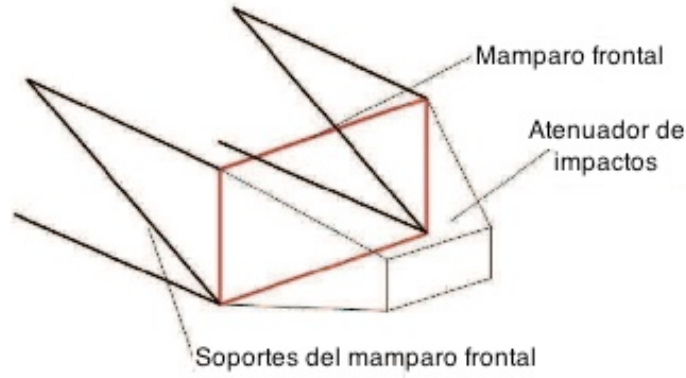


Imagen 19. Descripción de la parte frontal de la estructura

En este caso, la absorción de energía se puede considerar como la suma de tres elementos:

- La energía elástica E_N debida a la tensión normal N_2 :

$$E_N = \int \frac{N^2}{2 \cdot E \cdot A} \cdot ds$$

- La energía elástica E_B debida a la tensión por flexión:

$$E_B = \int \frac{M_x^2}{2 \cdot E \cdot I} \cdot ds$$

- La energía elástica E_T debida a la tensión por torsión:

$$E_T = \int \frac{M_z^2}{2 \cdot G \cdot I_0} \cdot ds$$

donde N , M_x y M_z son, respectivamente, la fuerza a tracción, el momento flector y el momento torsor; E es el módulo de elasticidad y A , I e I_0 son, respectivamente, el área, el momento de inercia y el momento polar de inercia de la sección transversal.

Por lo tanto, obtenemos:

$$E_N^{(A)} + E_B^{(A)} + E_T^{(A)} < E_N^{(B)} + E_B^{(B)} + E_T^{(B)},$$

demostrando que cuanto mayor sea la rigidez, menor es la disipación de energía.

4.1.3 Descripción de las cargas

El modelo consta del chasis en acero, especificando la geometría de cada uno de los elementos y sus propiedades mecánicas; y el conjunto de la suspensión y las ruedas, modelizados como un cuerpo rígido con el objetivo de transmitir íntegramente las cargas.

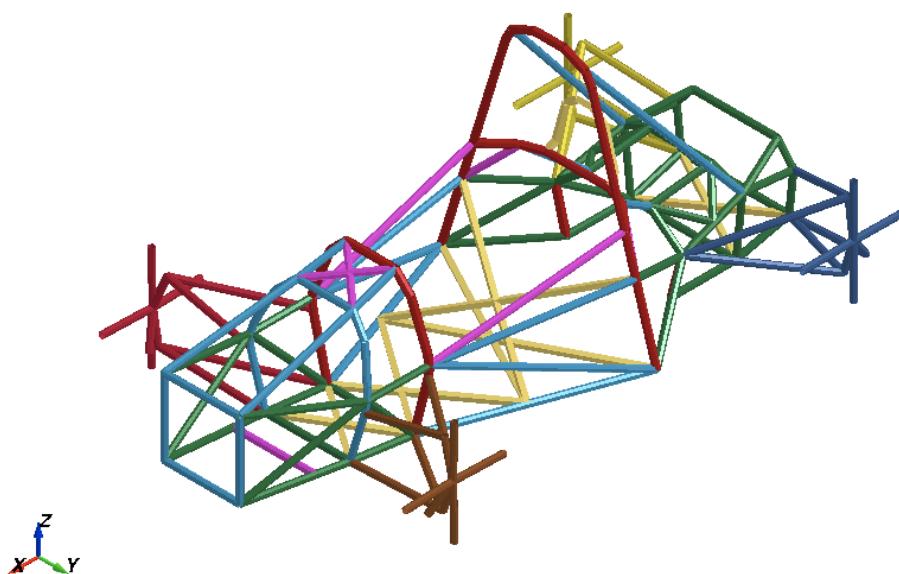


Imagen 20. Modelo de chasis ET4 con suspensión y ruedas

Una vez modelizada la estructura, se ha restringido el movimiento en la parte posterior del eje, empotrando las ruedas traseras.

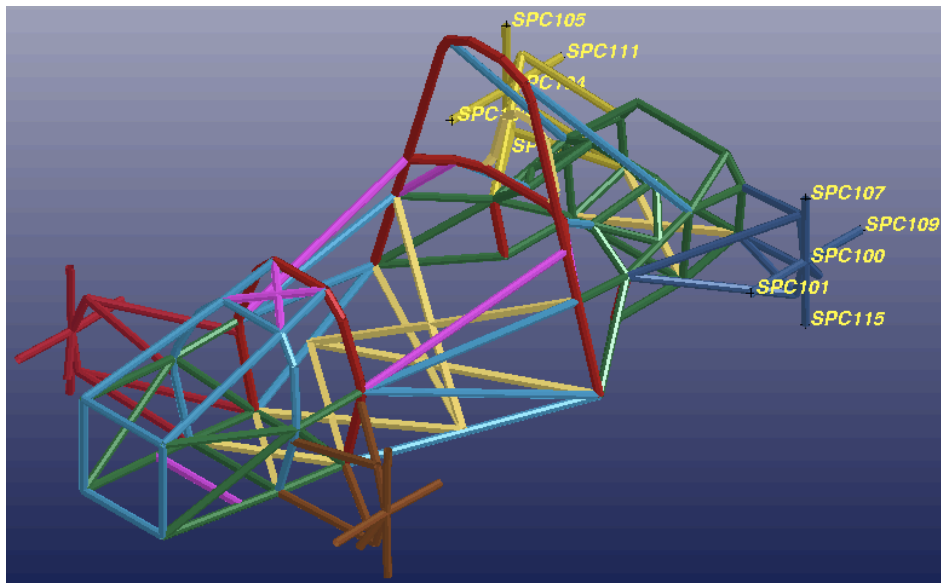


Imagen 21. Restricciones al movimiento en el eje posterior

A continuación, se ha aplicado, progresivamente en el tiempo, un par de fuerzas con dirección al eje z, de igual magnitud y sentidos opuestos, sobre las ruedas delanteras, en los puntos en los que muestra la imagen, generando un momento torsor alrededor del eje x, tal y como se aprecia en la gráfica.

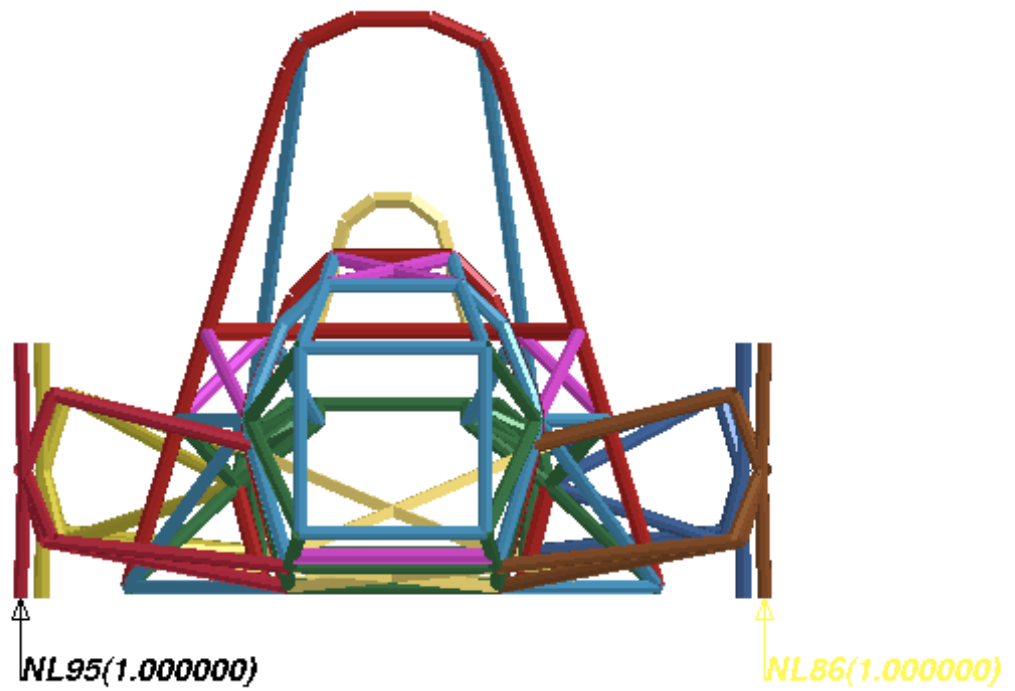


Imagen 22. Puntos de aplicación de las cargas

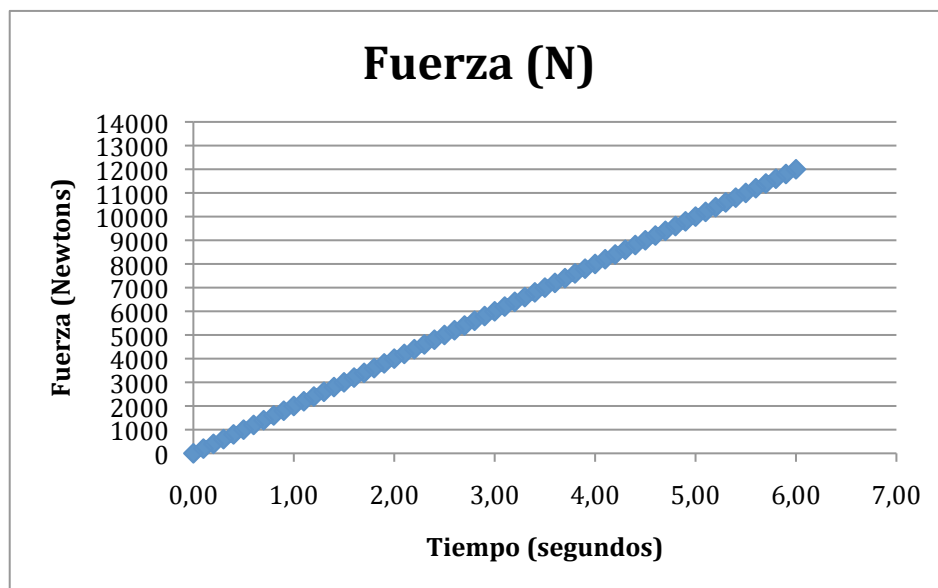


Imagen 23. Fuerza aplicada en función del tiempo

4.1.4 Resultados

Tras aplicar las fuerzas, la estructura se deforma según muestra la siguiente imagen.



Imagen 24. Representación del desplazamiento de la estructura

La estructura del chasis tiene una masa de 33,11 kg, sin contar con las suspensiones y las ruedas.

La rigidez a torsión se calcula con el momento torsor que soporta la estructura por unidad de giro (grados) sin que ninguna de sus partes plastifique.

El límite de plastificación del acero AISI 4130 es de 610 MPa. Una vez superado este límite de tensión, las deformaciones sufridas por el material serán permanentes, modificando las propiedades mecánicas del material. Tras el análisis se mide la tensión de Von-Mises en cada una de las barras de la estructura, obteniéndose que las primeras que plastifican son las secciones indicadas en la imagen. El giro máximo experimentado por la estructura, antes de que alguna de las barras plastifique es de 1,85°.

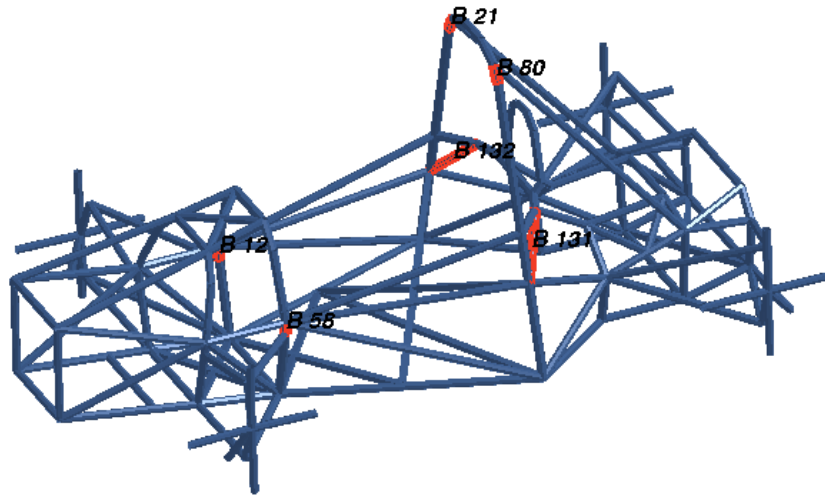


Imagen 25. Elementos primeros en plastificar

El momento aplicado se obtiene multiplicando la fuerza aplicada en cada instante por el radio, que es la distancia del punto de aplicación de las ruedas al punto de origen.

El giro se obtiene a partir de la solución del programa, midiendo la variación en los desplazamientos.

Estos datos se representan en una gráfica. La pendiente de la gráfica que relaciona el momento y el giro representa la rigidez torsional, que tiene un valor de $2970,8 \text{ N}\cdot\text{m}/^\circ$.

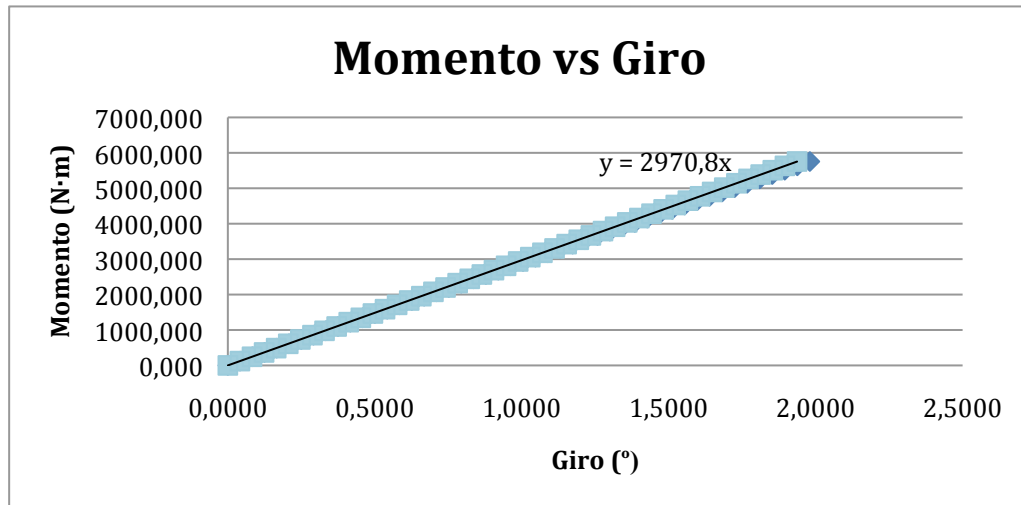


Imagen 26. Representación del Momento torsor frente al Giro de la estructura inicial

Comparando estos datos con los experimentales, en los que la masa es de 33 kg, y la rigidez torsional es de 2950 N·m/°, se llega a la conclusión de que el modelo se aproxima a la realidad. El error cometido es de:

$$error = \frac{2970,8 - 2950}{2950} \cdot 100 = 0,705\%$$

Este error, inferior al 1%, se puede considerar aceptable. Las diferencias se pueden explicar si se considera que la discretización del modelo realiza diversas aproximaciones e hipótesis simplificando el problema, que tienen un coste en términos de precisión. Además, se debe tener en cuenta que el modelo diseñado considera condiciones ideales, que en la realidad pueden variar debido a fallos del material, defectos de fabricación y cambios de las propiedades mecánicas en los puntos de unión de las barras.

Por tanto, puesto que el chasis diseñado cumple perfectamente la normativa, y el modelo de elementos finitos se considera válido, por su cercanía a la realidad, se tomará como base para estudiar la optimización del chasis.

4.1.5 Primera modificación

Se ha considerado que las barras 131 y 132 (en la imagen 23) no deben plastificar en primer lugar, por lo que se ha procedido a modificar su geometría, de modo que quedaría, tal y como muestran la imagen y la siguiente tabla:

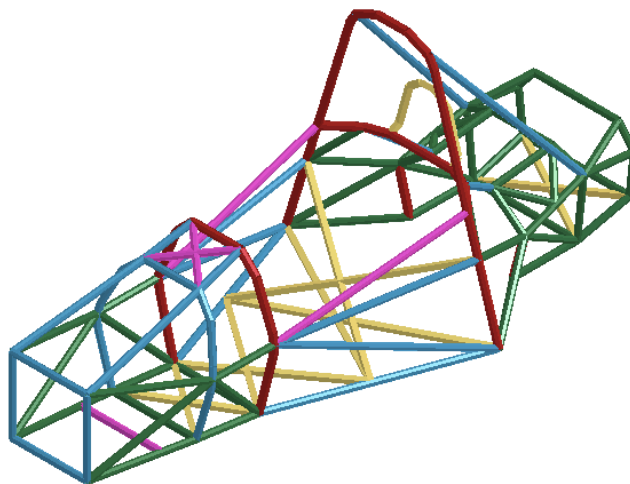


Imagen 27. Geometría del chasis tras la primera modificación

Color	Elemento o aplicación	Dimensión exterior x espesor
Sección 1	Arco principal y arco frontal. Barras de soporte de los hombros del piloto.	Tubos de sección circular de 28.575 mm x 4.22 mm
Sección 2	Estructura protección contra impacto lateral, mampara de protección frontal, arco auxiliar delantero. Fijaciones del arnés de retención del conductor.	Tubos de sección circular de 25.0 mm x 1.75 mm
Sección 3	Soportes del mampara frontal y del los arcos principales y auxiliar.	Tubos de sección circular de 25.0 mm x 1.50 mm
Sección 4	Estructura auxiliar principal.	Tubos de sección circular de 25.0 mm x 0.5 mm
Sección 5	Estructura auxiliar secundaria.	Tubo de sección circular de 19.0 mm x 1.0 mm

El procedimiento seguido es el mismo que inicialmente. Con esto, se ha llegado a los siguientes resultados. El peso ha aumentado hasta los 33,2 kg y la rigidez ha alcanzado un valor de 3033,4 N·m/°, alcanzando un grado máximo de giro de 1,94°.

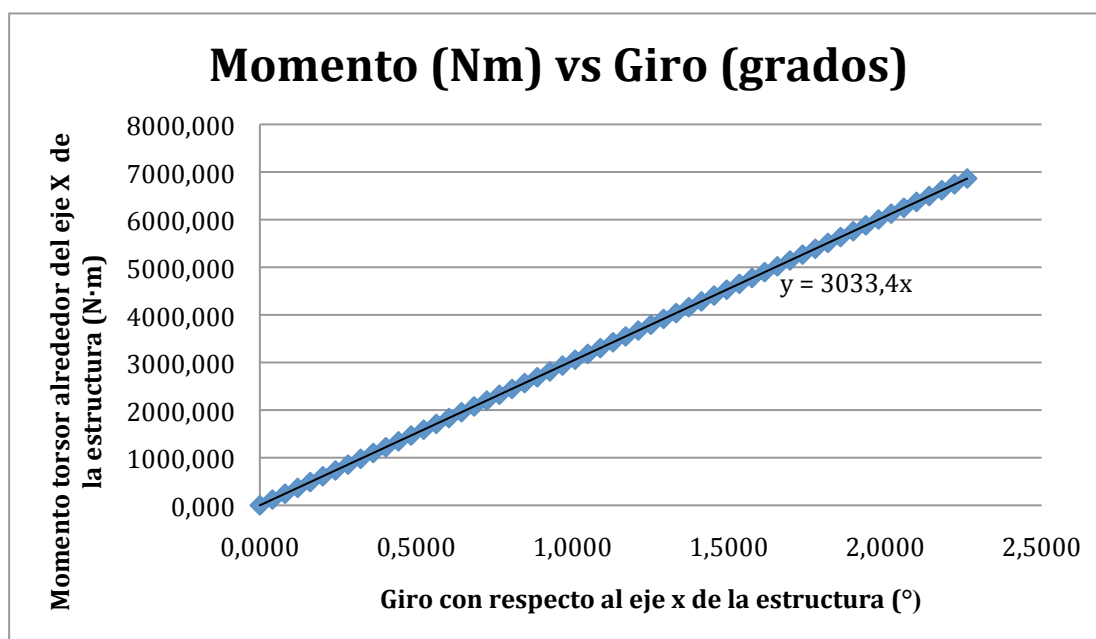


Imagen 28. Representación del Momento torsor frente al Giro tras la modificación

4.1.6 Secciones críticas

De cara a trabajos futuros, se va a establecer la criticidad de cada una de las secciones. Esto es, se cambiará el espesor de cada una de las secciones, manteniendo el resto constantes, con el objetivo de identificar cuál de ellas influye en mayor medida en la rigidez torsional, de manera que puedan ser susceptibles o no de modificar.

Además, hay que tener en cuenta que el peso de cada sección, tal y como muestra la siguiente tabla:

Sección	Masa (kg)
1	7,34
2	6,55
3	8,62
4	1,72
5	8,97

Sección 1. Arco principal, arco frontal y barras de soporte de los hombros del piloto

Las modificaciones realizadas en el espesor de la sección 1 se muestran en la siguiente tabla.

Espesor (mm)	Rigidez (N·m/°)	Masa (kg)	Giro máximo (°)	
3,075	2919,1	31,59	1,97	
4,217	3033,4	33,20	1,94	Referencia
5,075	3100,2	34,37	2,45	
6,575	3189,9	36,30	2,61	

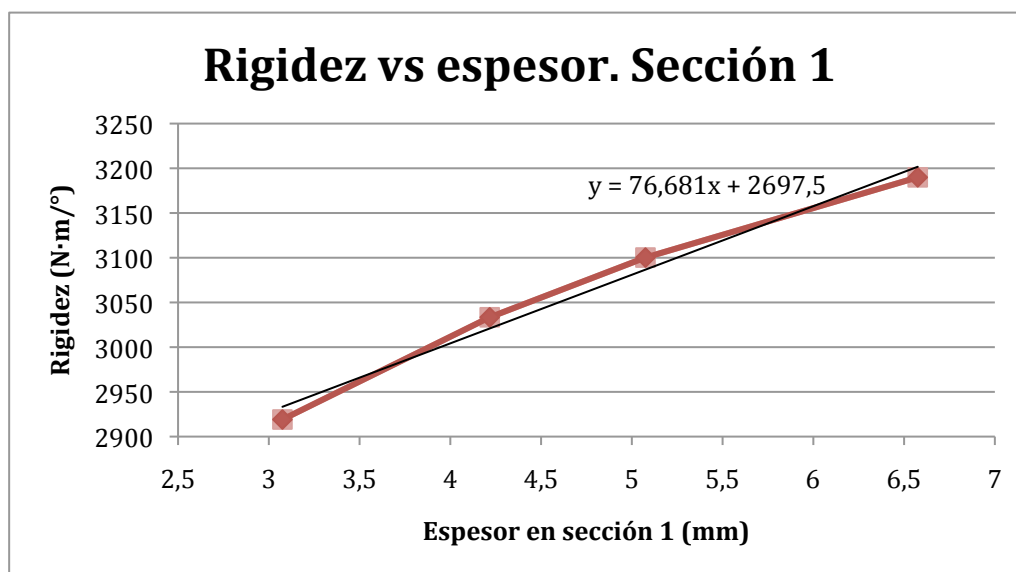


Imagen 29. Variación de la rigidez torsional en función del espesor en la sección 1

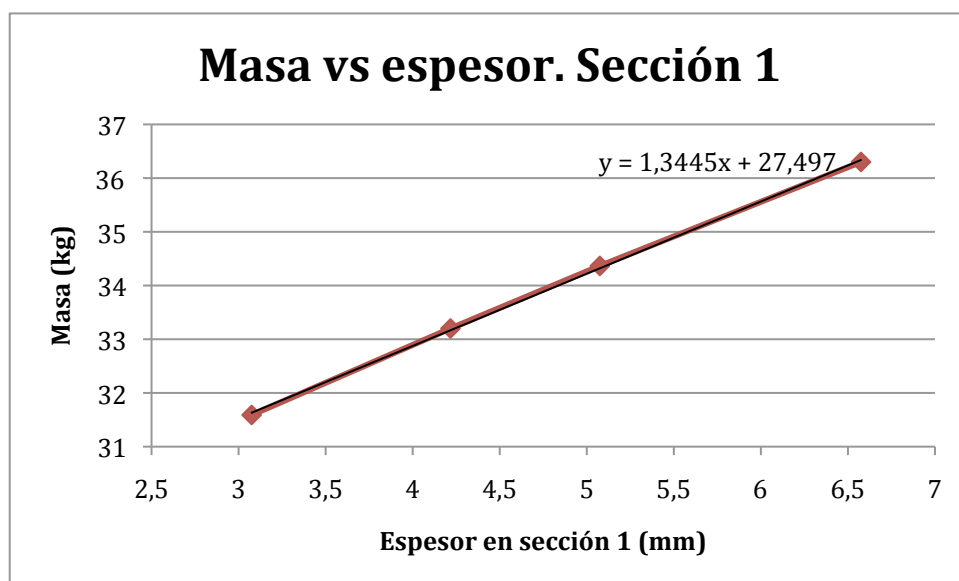


Imagen 30. Variación del peso del chasis en función del espesor en la sección 1

Sección 2. Estructura de protección contra impacto lateral,
mampara de protección frontal, arco auxiliar delantero y fijaciones
del arnés de retención del conductor

Las modificaciones realizadas en el espesor de la sección 2 se muestran en la siguiente tabla.

Espesor (mm)	Rigidez (N·m/°)	Masa (kg)	Giro máximo (°)	
0,75	2639,7	31,66	2,5	
1,75	3033,4	33,20	2,07	Referencia
3	3765,7	36,92	1,95	

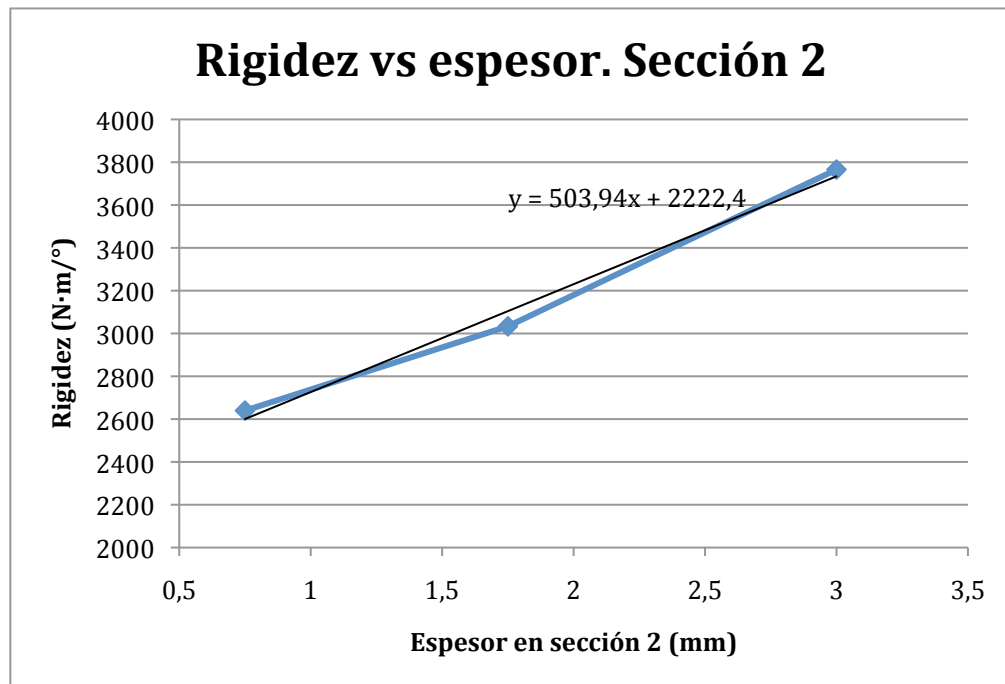


Imagen 31. Variación de la rigidez torsional en función del espesor en la sección 2

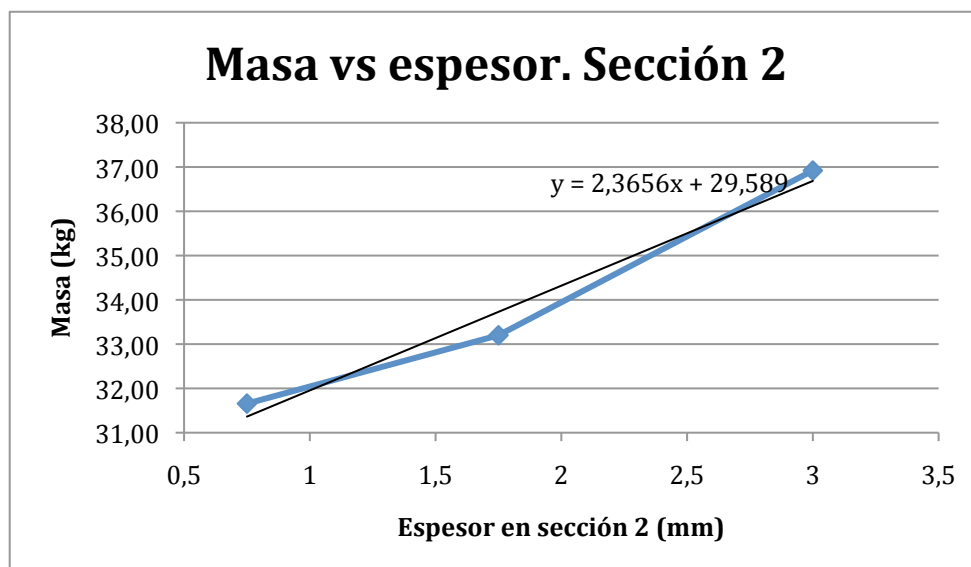


Imagen 32. Variación del peso del chasis en función del espesor en la sección 2

Sección 3. Soportes del mampara frontal y de los arcos principales y auxiliar

Las modificaciones realizadas en el espesor de la sección 3 se muestran en la siguiente tabla.

Espesor (mm)	Rigidez (N·m/°)	Masa (kg)	Giro máximo (°)	
0,5	2013,3	28,655	2,025	
1,5	3033,4	33,2	2,07	Referencia
3	3883,7	39,655	1,93	

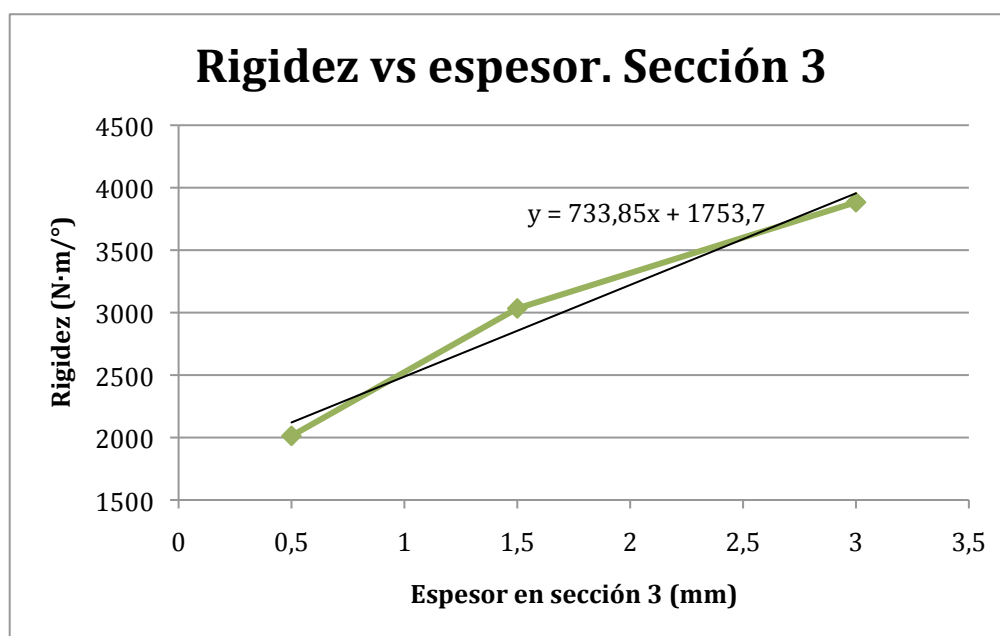


Imagen 33. Variación de la rigidez torsional en función del espesor en la sección 3

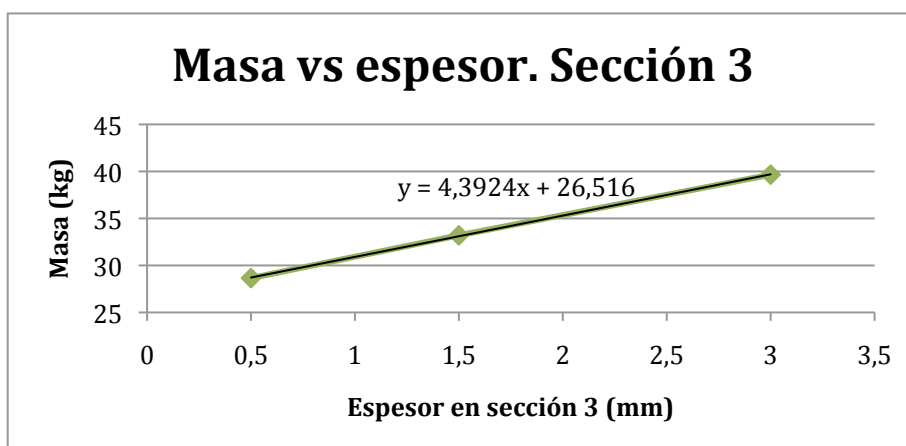


Imagen 34. Variación del peso del chasis en función del espesor en la sección 3

Sección 4. Estructura auxiliar principal

Las modificaciones realizadas en el espesor de la sección 4 se muestran en la siguiente tabla.

Espesor (mm)	Rigidez (N·m/°)	Masa (kg)	Giro máximo (°)	
0,25	3028,5	32,95	2,08	
0,5	3033,4	33,2	2,07	Referencia
2	3048,6	34,17	2,07	

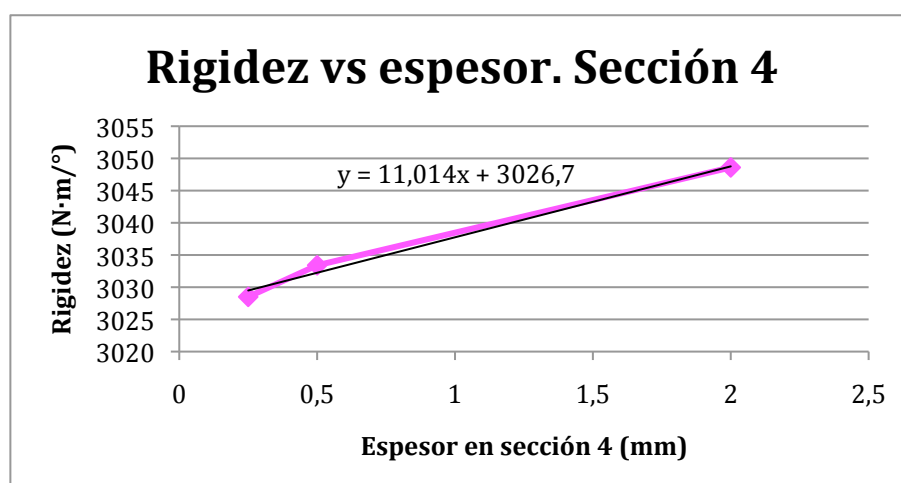


Imagen 35. Variación de la rigidez torsional en función del espesor en la sección 3

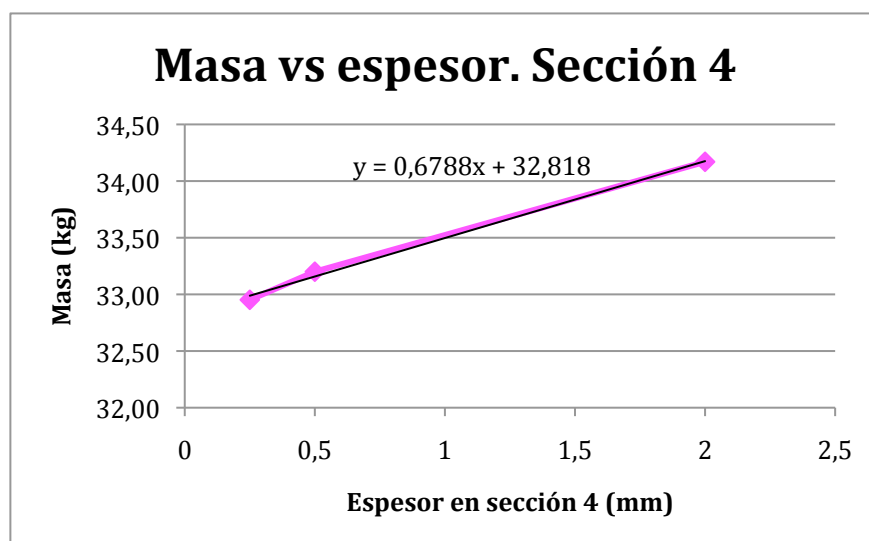


Imagen 36. Variación del peso del chasis en función del espesor en la sección 4

Sección 5. Estructura auxiliar secundaria

Las modificaciones realizadas en el espesor de la sección 4 se muestran en la siguiente tabla.

Espesor (mm)	Rigidez (N·m/°)	Masa (kg)	Giro máximo (°)	
0,25	2879,6	32,406	2,07	
1	3033,4	33,2	2,07	Referencia
2	3113,7	34,176	2,09	

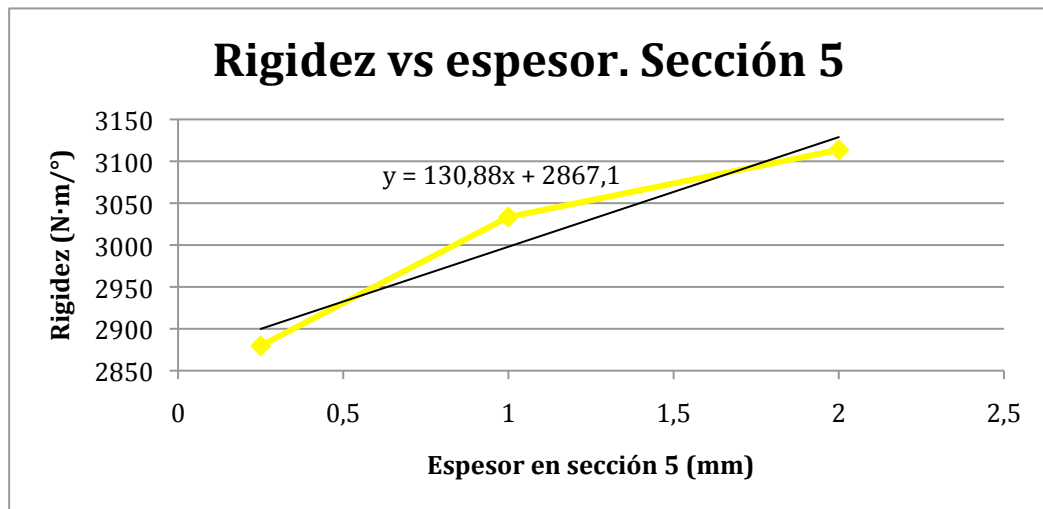


Imagen 37. Variación de la rigidez torsional en función del espesor en la sección 3

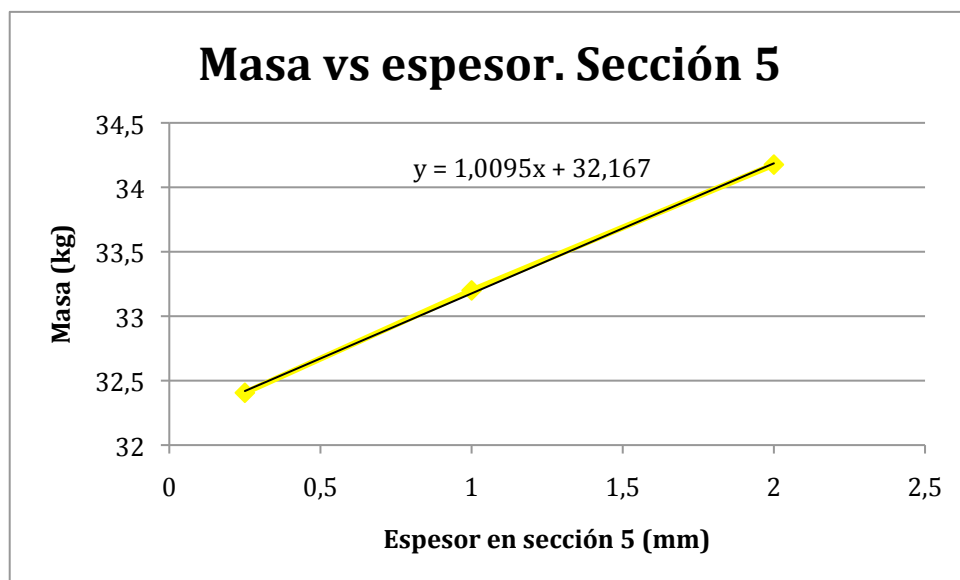


Imagen 38. Variación del peso del chasis en función del espesor en la sección 4

4.2 Estudio de chasis combinado de acero y aluminio

Se han realizado dos modificaciones con aluminio. La primera de ellas, sustituyendo las partes auxiliares cuyas dimensiones no están estipuladas en la normativa SAE, de modo que no es necesaria la demostración de la equivalencia estructural. La segunda modificación contempla la sustitución de partes más críticas de la estructura.

El análisis de la estructura se ha llevado a cabo de la misma manera que en el apartado anterior, aplicando las mismas cargas.

El aluminio utilizado es el aluminio 5083, cuyas propiedades son las siguientes:

- Módulo de elasticidad de 71 GPa.
- Densidad de 2.657 kg/m³.
- Coeficiente de Poisson 0,33.

En los apartados siguientes se detallan los resultados.

4.2.1 Versión primera

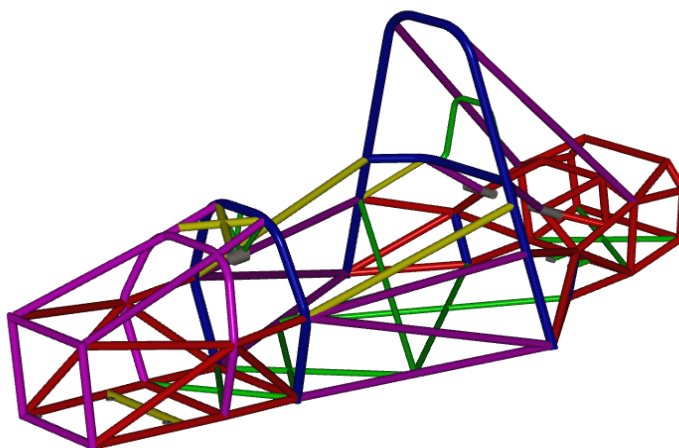


Imagen 39. Geometría del chasis acero-aluminio

CAPITULO 4: ANÁLISIS NUMÉRICO DEL CHASIS

Color	Elemento o aplicación	Dimensión exterior x espesor
Sección 1	Arco principal y arco frontal. Barras de soporte de los hombros del piloto.	Tubos de sección circular de 28.575 mm x 4.22 mm de acero AISI 4130
Sección 2	Estructura protección contra impacto lateral, mampara de protección frontal, arco auxiliar delantero. Fijaciones del arnés de retención del conductor.	Tubos de sección circular de 25.0 mm x 1.75 mm de acero AISI 4130
Sección 3	Soportes del mampara frontal y del los arcos principales y auxiliar.	Tubos de sección circular de 25.0 mm x 1.50 mm de acero AISI 4130
Sección 4	Estructura auxiliar principal.	Tubos de sección circular de 25.0 mm x 0.5 mm de aluminio 5083
Sección 5	Estructura auxiliar secundaria.	Tubo de sección circular de 19.0 mm x 1.0 mm de aluminio 5083

Con esta geometría se ha obtenido un peso de 26,12 kg y una rigidez torsional de 2070,6 N·m/°, tal y como se refleja en la siguiente gráfica. El giro máximo que soporta la estructura antes de plastificar es de 2,55°.

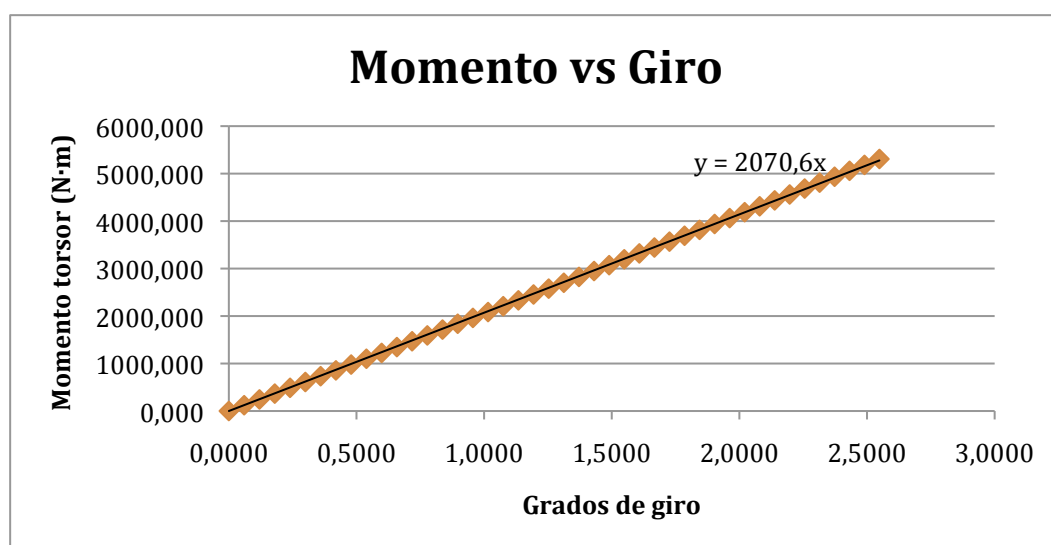


Imagen 40. Representación del Momento torsor frente al Giro de la primera versión con aluminio

4.2.2 Versión segunda

En esta segunda modificación, se han mantenido en acero únicamente los arcos principal y frontal y las barras de soporte de los hombros del piloto. Por tanto, al comprender partes especificadas en la norma, se debe demostrar su equivalencia estructural.

Demostración de equivalencia de la estructura de protección contra impacto lateral, mampara de protección frontal, arco auxiliar delantero y las fijaciones del arnés de retención del conductor.

Descripción del elemento utilizado

Como se ha explicado anteriormente, se ha escogido una aleación de aluminio y magnesio, con denominación Aluminio 5083 con las siguientes características:

	Aluminio 5083	S235Jr
Límite de elasticidad R_p (MPa)	145	235
Resistencia última R_u (MPa)	335,09	360
Módulo de elasticidad (GPa)	71,016	210
Módulo de rigidez G (GPa)	26,7	80,77

Para definir una geometría que suponga una equivalencia estructural, se buscará cumplir las condiciones necesarias para ello, partiendo a partir de perfiles normalizados, de la empresa ALU-STOCK S.A.:

CAPITULO 4: ANÁLISIS NUMÉRICO DEL CHASIS





























































(mm)	\div (mm)									
	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	4,00	5,00	6,00	8,00	10,00
9,9	1,85									
10	()									
12										
13	1,25									
16										
17,1										
18	()	()								
20	()									
21										
22										
25										
25,6						4,55				
26,5										
28				()						
30										
32		()		()						
33										
35					(3,50)					
36,2							(5,35)			
38										
40										
42										
45		()								
47										
48			()							
49										
50			()							
52										

Imagen 41. Dimensiones geométricas normalizadas para tubos de aluminio

La geometría mínima requerida del acero tiene la siguiente geometría:

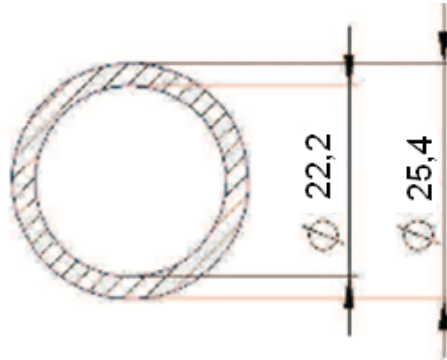


Imagen 42. Dimensiones geométricas del tubo de acero estándar

Cálculos

Resistencia a pandeo

La carga crítica a pandeo F_R se puede expresar de la siguiente manera:

$$F_R = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l^2}$$

$$F_R^{Aluminio} \geq F_R^{Acero}$$

$$\frac{\pi^2 \cdot E_{Aluminio} \cdot I_{Aluminio}}{l^2} \geq \frac{\pi^2 \cdot E_{Acero} \cdot I_{Acero}}{l^2}$$

Por lo que, para demostrar la equivalencia a pandeo, hay que demostrar que el producto del momento de inercia I por el módulo de elasticidad del aluminio es mayor o igual al producto del momento de inercia por el módulo de elasticidad del acero, puesto las longitudes son iguales en ambos casos. Es decir:

$$E_{Al} \cdot I_{Al} \geq E_{ac} \cdot I_{ac}$$

$$E_{Al} \cdot \frac{\pi \cdot (D_{ext,Al}^4 - D_{int,Al}^4)}{64} \geq E_{ac} \cdot \frac{\pi \cdot (D_{ext,ac}^4 - D_{int,ac}^4)}{64}$$

$$E_{Al} \cdot (D_{ext,Al}^4 - D_{int,Al}^4) \geq E_{ac} \cdot (D_{ext,ac}^4 - D_{int,ac}^4)$$

Teniendo en cuenta estos datos, el mínimo perfil que lo cumple es el que tiene un diámetro exterior de 30 mm y espesor 4 mm. Se comprueba a continuación:

$$71,016 \cdot 10^9 \cdot (0,03^4 - 0,022^4) \geq 210 \cdot 10^9 \cdot (0,0254^4 - 0,0222^4)$$

$$40887,036 N \cdot m^2 \geq 36401,433 N \cdot m^2$$

Por lo que el perfil seleccionado es equivalente al estándar frente a pandeo.

Disipación de energía

Con el objeto de obtener la disipación de energía del frontal, se considera un impacto frontal, con las mismas condiciones que en la demostración de la equivalencia del tubo de acero anterior.

Al igual que en el caso anterior, la absorción de energía se puede considerar como la suma de tres elementos:

- La energía elástica E_N debida a la tensión normal N_2

$$E_N = \int \frac{N^2}{2 \cdot E \cdot A} \cdot ds$$

- La energía elástica E_B debida a la tensión por flexión

$$E_B = \int \frac{M_x^2}{2 \cdot E \cdot I} \cdot ds$$

- La energía elástica E_T debida a la tensión por torsión

$$E_T = \int \frac{M_z^2}{2 \cdot G \cdot I_0} \cdot ds$$

donde N , M_x y M_z son, respectivamente, la fuerza a tracción, el momento flector y el momento torsor; E es el módulo de elasticidad y A , I e I_0 son, respectivamente, el área, el momento de inercia y el momento polar de inercia de la sección transversal.

CAPITULO 4: ANÁLISIS NUMÉRICO DEL CHASIS

Por lo tanto, se comprueba si el perfil seleccionado cumple lo siguiente:

$$E_N^{(Al)} + E_B^{(Al)} + E_T^{(Al)} \leq E_N^{(Ac)} + E_B^{(Ac)} + E_T^{(Ac)}$$

Simplificando, la ecuación a comprobar queda:

$$\frac{1}{E_{Al} \cdot A_{Al}} + \frac{1}{E_{Al} \cdot I_{Al}} + \frac{1}{G_{Al} \cdot I_{Al}} \leq \frac{1}{E_{ac} \cdot A_{ac}} + \frac{1}{E_{ac} \cdot I_{ac}} + \frac{1}{G_{ac} \cdot I_{ac}}$$

El área y el momento de inercia del perfil de aluminio son:

$$A_{Alum} = \frac{\pi \cdot (D_{ext,Al}^2 - D_{int,Al}^2)}{4} = \frac{\pi \cdot (0,03^2 - 0,022^2)}{4} = 3,267 \cdot 10^{-4} m^2$$

$$I_{Alum} = \frac{\pi \cdot (D_{ext,Al}^4 - D_{int,Al}^4)}{4} = \frac{\pi \cdot (0,03^4 - 0,022^4)}{64} = 2,826 \cdot 10^{-8} m^4$$

El área y el momento de inercia del perfil de acero estándar son:

$$A_{acero} = \frac{\pi \cdot (D_{ext,ac}^2 - D_{int,ac}^2)}{4} = \frac{\pi \cdot (0,0254^2 - 0,0222^2)}{4} = 1,196 \cdot 10^{-4} m^2$$

$$I_{acero} = \frac{\pi \cdot (D_{ext,ac}^4 - D_{int,ac}^4)}{4} = \frac{\pi \cdot (0,0254^4 - 0,0222^4)}{64} = 8,51 \cdot 10^{-9} m^4$$

Por tanto, comparándolos:

$$\frac{1}{71,016 \cdot 10^9 \cdot 3,267 \cdot 10^{-4}} + \frac{1}{71,016 \cdot 10^9 \cdot 2,826 \cdot 10^{-8}} + \frac{1}{26,7 \cdot 10^9 \cdot 2,826 \cdot 10^{-8}} \leq$$

$$\frac{1}{210 \cdot 10^9 \cdot 1,196 \cdot 10^{-4}} + \frac{1}{210 \cdot 10^9 \cdot 8,51 \cdot 10^{-9}} + \frac{1}{80,77 \cdot 10^9 \cdot 8,51 \cdot 10^{-9}}$$

$$1,824 \cdot 10^{-3} \leq 2,014 \cdot 10^{-3}$$

Como se puede ver, el perfil de aluminio disipa menor energía que el perfil estándar de acero, demostrando que cuanto mayor sea la rigidez, menor es la disipación de energía.

Resistencia a tracción

La tensión, debida a una fuerza axial se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

Incluso si las propiedades del material son mayores que las mínimas del material requerido, el área A_{Al} de la sección del tubo de aluminio debe ser mayor o igual al área mínima requerida del tubo de acero estándar.

En el apartado anterior se han calculado las áreas, por lo que $A_{Aluminio} > A_{Acero}$. Esto significa que el perfil de aluminio soporta una mayor fuerza axial con una sección A_{Al} con respecto al S235Jr con una sección A_{Ac} .

Resistencia a flexión

La tensión producida debido a flexión se puede calcular del siguiente modo:

$$\sigma = \frac{M \cdot D_{out}}{2I}$$

Para demostrar la equivalencia a flexión, se debe cumplir que el momento de inercia respecto a un eje de la sección transversal $I_{Aluminio}$ debe ser mayor o igual al momento de inercia de la sección mínima requerida I_{acero} .

Considerando que:

$$\frac{I_{Al}}{D_{extAl}} = \frac{2,826 \cdot 10^{-8} m^4}{0,03m} = 9,42 \cdot 10^{-7} m^3$$
$$\frac{I_{Ac}}{D_{extAc}} = \frac{8,51 \cdot 10^{-9} m^4}{0,0254m} = 3,35 \cdot 10^{-7} m^3$$

Se llega a la conclusión de que:

$$\frac{I_{Aluminio}}{D_{extAl}} > \frac{I_{Acero}}{D_{extAc}}$$

Es decir, que el momento flector soportado por el perfil de aluminio es mayor que el que soporta el estándar.

*Demostración de equivalencia de los soportes del mampara frontal
y de los arcos principales y auxiliar*

Se seguirá el mismo procedimiento que en el apartado anterior.

La geometría mínima requerida del acero tiene la siguiente geometría:

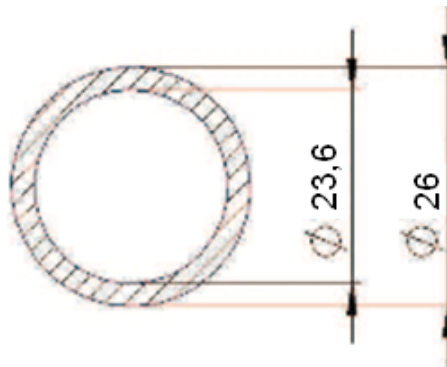


Imagen 43. Dimensiones geométricas mínimas del tubo de acero estándar

Cálculos

Resistencia a pandeo

Igualmente que en el apartado anterior, se aprecia el mínimo perfil que lo cumple es el que tiene un diámetro exterior de 30 mm y espesor 3 mm. Se comprueba a continuación:

$$71,016 \cdot 10^9 \cdot (0,03^4 - 0,024^4) \geq 210 \cdot 10^9 \cdot (0,026^4 - 0,0236^4)$$

$$33961,555 N \cdot m^2 \geq 30822,027 N \cdot m^2$$

Por lo que el perfil seleccionado es equivalente al estándar frente a pandeo.

Disipación de energía

De nuevo, realizando los mismos cálculos que en el apartado anterior, se comprueba si el perfil seleccionado cumple lo siguiente:

$$E_N^{(Al)} + E_B^{(Al)} + E_T^{(Al)} \leq E_N^{(Ac)} + E_B^{(Ac)} + E_T^{(Ac)}$$

Simplificando, la ecuación a comprobar queda:

$$\frac{1}{E_{Al} \cdot A_{Al}} + \frac{1}{E_{Al} \cdot I_{Al}} + \frac{1}{G_{Al} \cdot I_{Al}} \leq \frac{1}{E_{ac} \cdot A_{ac}} + \frac{1}{E_{ac} \cdot I_{ac}} + \frac{1}{G_{ac} \cdot I_{ac}}$$

El área y el momento de inercia del perfil de aluminio son:

$$A_{Alum} = \frac{\pi \cdot (D_{ext,Al}^2 - D_{int,Al}^2)}{4} = \frac{\pi \cdot (0,03^2 - 0,024^2)}{4} = 2,545 \cdot 10^{-4} m^2$$

$$I_{Alum} = \frac{\pi \cdot (D_{ext,Al}^4 - D_{int,Al}^4)}{64} = \frac{\pi \cdot (0,03^4 - 0,024^4)}{64} = 2,347 \cdot 10^{-8} m^4$$

El área y el momento de inercia del perfil de acero estándar son:

$$A_{acero} = \frac{\pi \cdot (D_{ext,ac}^2 - D_{int,ac}^2)}{4} = \frac{\pi \cdot (0,026^2 - 0,0236^2)}{4} = 9,349 \cdot 10^{-5} m^2$$

$$I_{acero} = \frac{\pi \cdot (D_{ext,ac}^4 - D_{int,ac}^4)}{64} = \frac{\pi \cdot (0,0254^4 - 0,0222^4)}{64} = 7,205 \cdot 10^{-9} m^4$$

Por tanto, comparándolos:

$$\frac{1}{71,016 \cdot 10^9 \cdot 2,545 \cdot 10^{-4}} + \frac{1}{71,016 \cdot 10^9 \cdot 2,347 \cdot 10^{-8}} + \frac{1}{26,7 \cdot 10^9 \cdot 2,347 \cdot 10^{-8}} \leq$$

$$\frac{1}{210 \cdot 10^9 \cdot 9,349 \cdot 10^{-5}} + \frac{1}{210 \cdot 10^9 \cdot 7,205 \cdot 10^{-9}} + \frac{1}{80,77 \cdot 10^9 \cdot 7,205 \cdot 10^{-9}}$$

$$2,196 \cdot 10^{-3} \leq 2,38 \cdot 10^{-3}$$

Como se puede ver, el perfil de aluminio disipa menor energía que el perfil estándar de acero, nuevamente demostrando que cuanto mayor sea la rigidez, menor es la disipación de energía..

Resistencia a tracción

La tensión, debida a una fuerza axial se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

Incluso si las propiedades del material son mayores que las mínimas del material requerido, el área A_{Al} de la sección del tubo de aluminio debe ser mayor o igual al área mínima requerida del tubo de acero estándar.

En el apartado anterior se han calculado las áreas, por lo que $A_{Aluminio} > A_{Acero}$. Esto significa que el perfil de aluminio soporta una mayor fuerza axial con una sección A_{Al} con respecto al S235Jr con una sección A_{Ac} .

Resistencia a flexión

La tensión producida debido a flexión se puede calcular del siguiente modo:

$$\sigma = \frac{M \cdot D_{out}}{2I}$$

Para demostrar la equivalencia a flexión, se debe cumplir que el momento de inercia respecto a un eje de la sección transversal $I_{Aluminio}$ debe ser mayor o igual al momento de inercia de la sección mínima requerida I_{acero} .

Considerando que:

$$\frac{I_{Al}}{D_{extAl}} = \frac{2,347 \cdot 10^{-8} m^4}{0,03m} = 7,82 \cdot 10^{-7} m^3$$

$$\frac{I_{Ac}}{D_{extAc}} = \frac{7,205 \cdot 10^{-9} m^4}{0,026m} = 2,77 \cdot 10^{-7} m^3$$

Se llega a la conclusión de que:

$$\frac{I_{Aluminio}}{D_{extAl}} > \frac{I_{Acero}}{D_{extAc}}$$

Es decir, que el momento flector soportado por el perfil de aluminio es mayor que el que soporta el estándar.

Resultados

La geometría del modelo queda, por tanto, así:

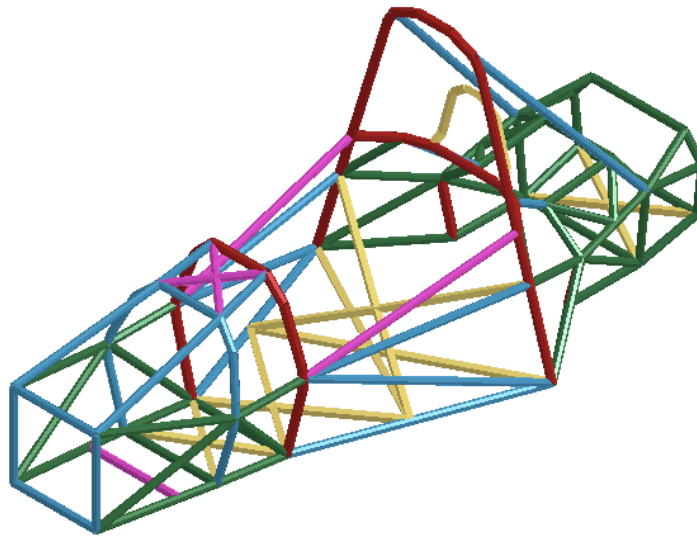


Imagen 44. Diseño geométrico del chasis de ET4

Color	Dimensión exterior x espesor
Sección 1	Tubos de sección circular de 28.575 mm x 4.22 mm de acero AISI 4130
Sección 2	Tubos de sección circular de 30.0 mm x 4.0 mm de aluminio 5083
Sección 3	Tubos de sección circular de 30.0 mm x 3.0 mm de aluminio 5083
Sección 4	Tubos de sección circular de 25.0 mm x 0.5 mm de aluminio 5083
Sección 5	Tubo de sección circular de 19.0 mm x 1.0 mm de aluminio 5083

Con esta geometría obtenemos una rigidez torsional de 5379,3 N·m/°, con un peso de 22,39 kg. La estructura soporta un giro máximo de 1,19°.

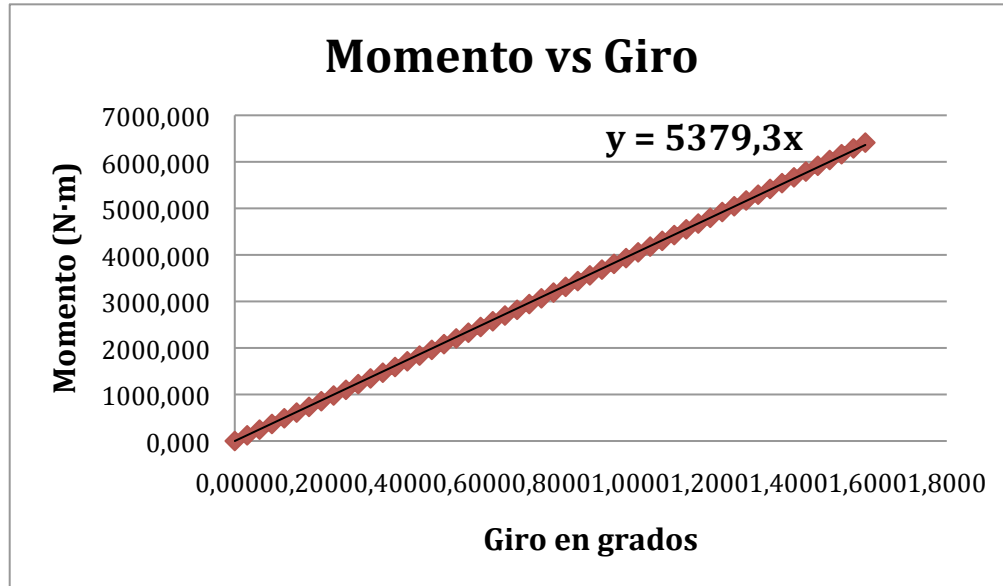


Imagen 45. Representación del Momento torsor frente al Giro de la segunda versión con aluminio

4.3 Estudio de chasis mixto de acero y fibra de carbono

Los materiales compuestos como la fibra de carbono presentan propiedades anisótropas, es decir, sus propiedades mecánicas dependen de la dirección en que se midan. Esto, unido al hecho de que son materiales relativamente nuevos, hace que su comportamiento aún no se pueda definir con la precisión con que se define el comportamiento de materiales isotrópicos como el acero o aluminio.

Se han realizado diferentes modificaciones del chasis para incorporar la fibra de carbono. En todas ellas el material se ha definido

como un elemento bidimensional en el programa, es decir, tipo shell. Se han utilizado láminas de un tejido de fibra con resina epoxi HexPly® 8552, con orientación $0^\circ/90^\circ$, de modo que sus propiedades son:

- Densidad de 1570 kg/m^3 .
- Módulos de elasticidad:
 - $E_a = 5 \text{ GPa}$
 - $E_b = 4,5 \text{ GPa}$
 - $E_c = 4,5 \text{ GPa}$
- Coeficientes de Poisson:
 - $\gamma_a = 0,22$
 - $\gamma_b = 0,072059$
 - $\gamma_c = 0,072059$
- Tensiones límite de rotura:
 - $\sigma_x^{\text{tracción}} = 880 \text{ MPa}$
 - $\sigma_x^{\text{compresión}} = 880 \text{ MPa}$
 - $\sigma_y^{\text{tracción}} = 880 \text{ MPa}$
 - $\sigma_y^{\text{compresión}} = 880 \text{ MPa}$
 - $\tau_{xy} = 84 \text{ MPa}$
- Espesor de cada lámina: $0,195 \text{ mm}$.

4.3.1 Dependencia con el número de láminas

En primer lugar se debe determinar el número de láminas necesarias para conseguir una rigidez equivalente al chasis original de acero. Para ello, se ha realizado un modelo de chasis combinado con acero, de modo que la parte posterior, el arco principal y el arco frontal se han mantenido de acero con las mismas dimensiones. El resto de elementos se han sustituido por una estructura de fibra de carbono, tal y como muestra la siguiente imagen.

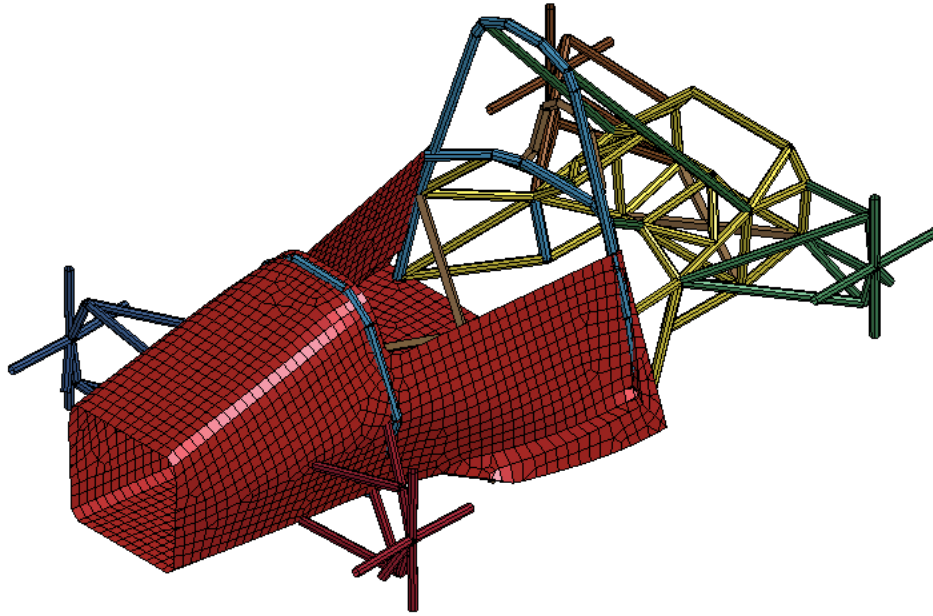


Imagen 46. Chasis combinado de acero y fibra de carbono

La estructura de acero se muestra en la imagen siguiente.

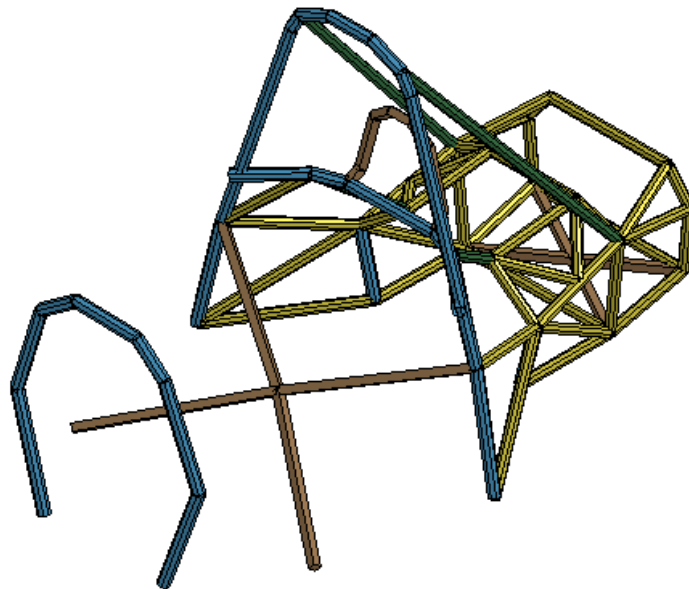


Imagen 47. Estructura de acero

Es necesario determinar el comportamiento del conjunto, por lo que los esfuerzos que soporta cada una de las láminas carecen de importancia

en este documento. Considerando que todas las láminas son iguales en orientación y espesor, se ha estudiado el laminado como uno sólo, estableciendo el número de láminas con el espesor total del laminado y determinando la orientación de las láminas a través de las propiedades anteriormente descritas.

Resultados

Se ha establecido un mínimo de 10 láminas, para no comprometer la rigidez, y un máximo de 30 láminas, para no aumentar en demasía el peso del chasis. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Nº Láminas	Rigidez (N·m/°)	Peso (kg)
10	334,74	22,20
15	704,70	25,93
20	1141,3	29,66
25	1642,7	33,39
30	2182,5	37,12

Representando estos datos en gráficas, se puede conseguir una interpretación de una manera más visual.

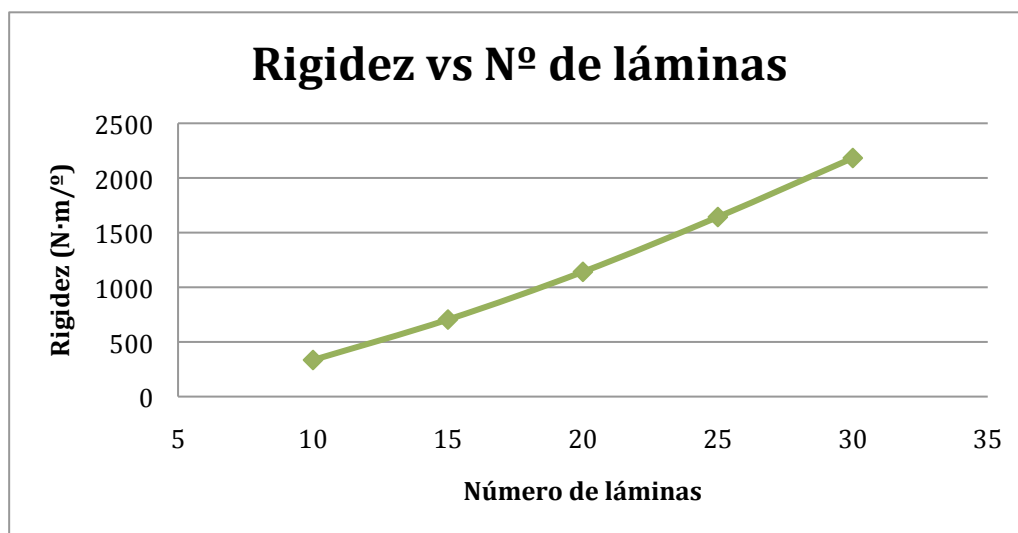


Imagen 48. Representación de la relación entre la rigidez y el número de láminas

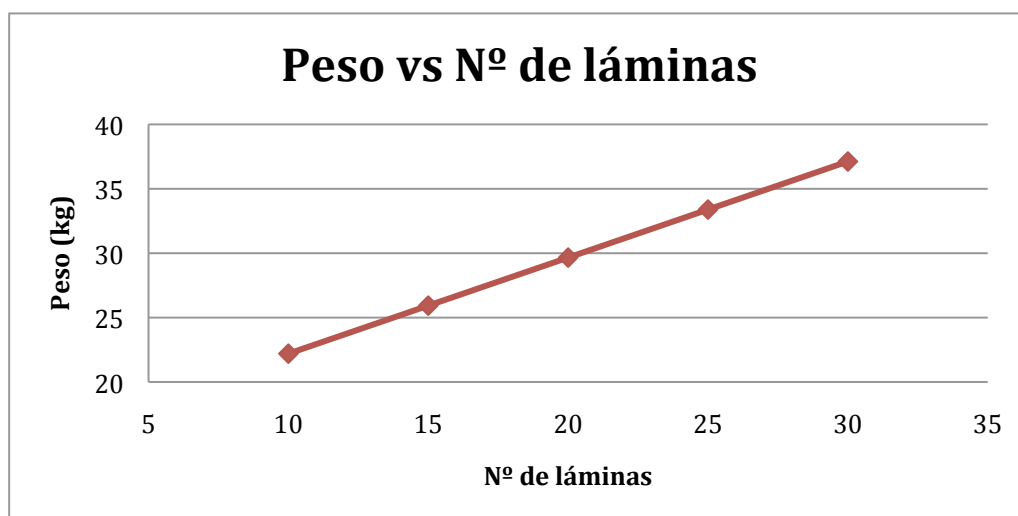


Imagen 49. Representación de la relación entre el peso del chasis y el número de láminas

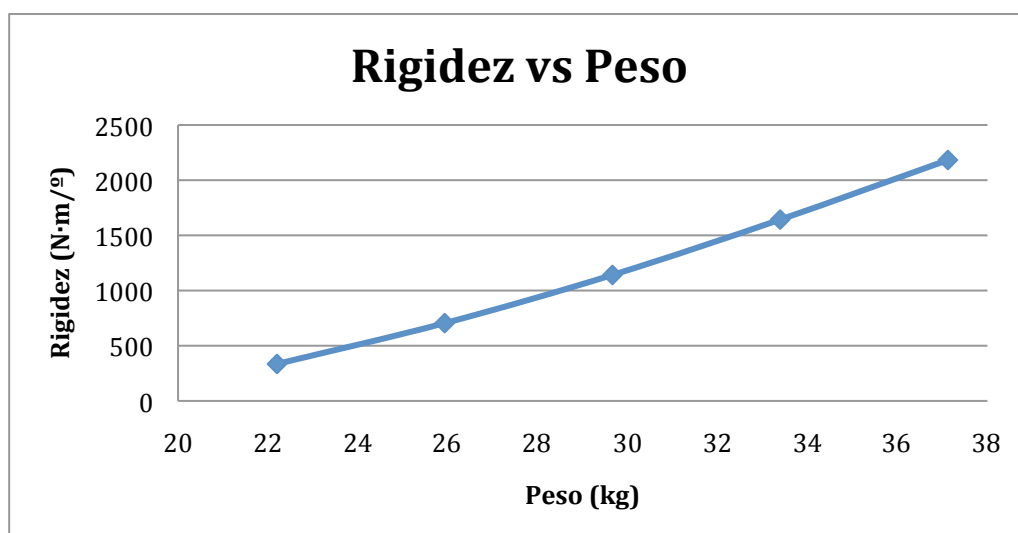


Imagen 50. Representación de la relación entre la rigidez y el peso de la estructura

En base a estos resultados, se puede concluir que, a pesar de que el que el dato más cercano al objetivo de igualar la rigidez del chasis de acero, de $3033,4 \text{ N}\cdot\text{m}/^\circ$, es el que se obtiene utilizando un laminado de 30 láminas, esta configuración supone un aumento de peso excesivo en la estructura. Por tanto, se ha optado por utilizar una combinación de 20-25 láminas, añadiendo algunos elementos más en acero para aumentar la rigidez, tal y como se muestra en el apartado siguiente.

4.3.2 Dependencia del número de elementos de acero

Una configuración de 20 láminas, con una rigidez obtenida de 1141,3 N·m/° o bien, una configuración de 25 láminas, con rigidez 1642,7 N·m/°, no cumplen el objetivo de equivalencia establecido, por lo que se ha optado por añadir elementos de acero en las secciones más comprometidas, que se pueden apreciar en la imagen a continuación.

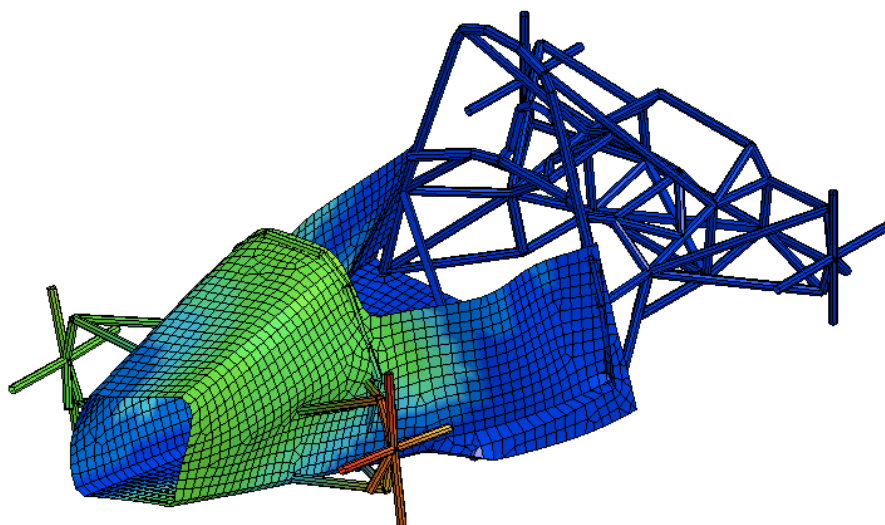


Imagen 51. Representación de las secciones más comprometidas

De esta forma, se han modelado varias diferentes configuraciones con el objetivo de determinar la mejor opción. Todos los elementos añadidos son tubos circulares de diámetro exterior 19 mm y espesor de 1 mm de acero AISI 4130. Las siguientes imágenes muestran las diferentes configuraciones estudiadas.

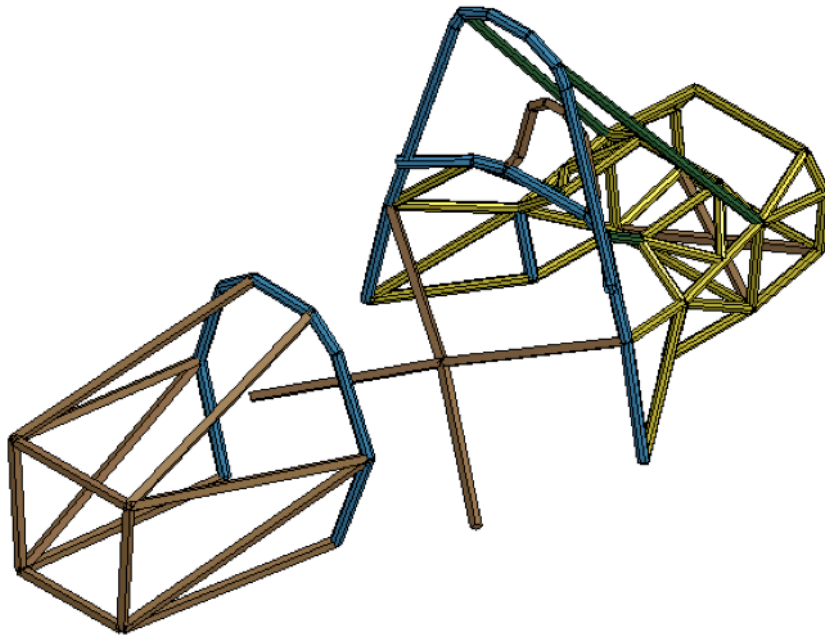


Imagen 52. Configuración 1

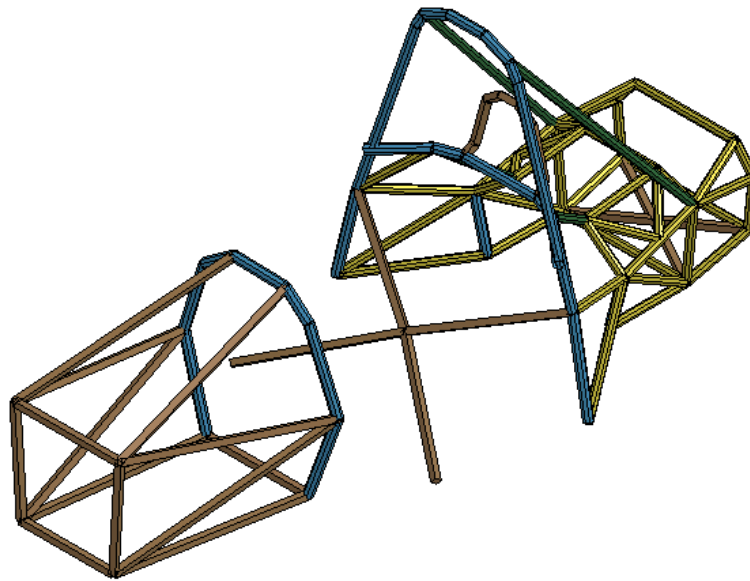


Imagen 53. Configuración 2

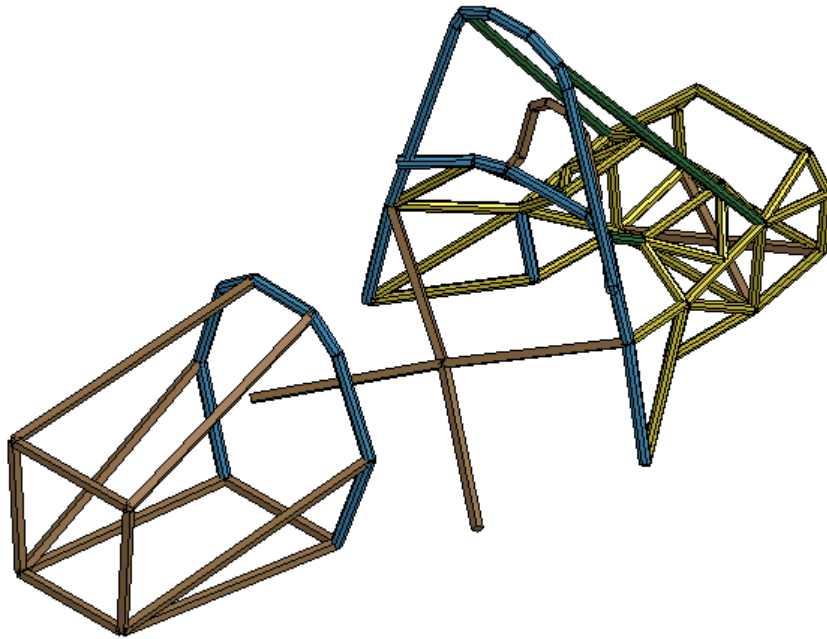


Imagen 54. Configuración 3

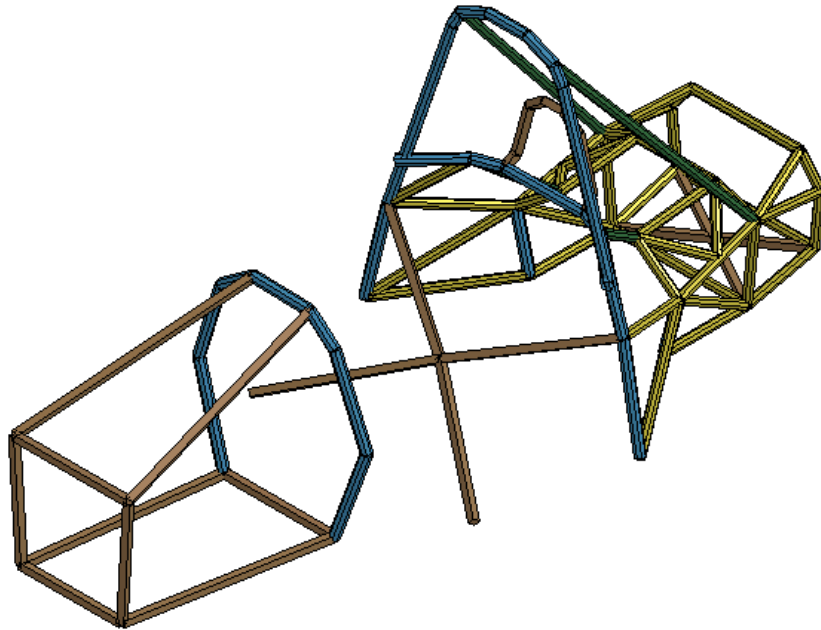


Imagen 55. Configuración 4

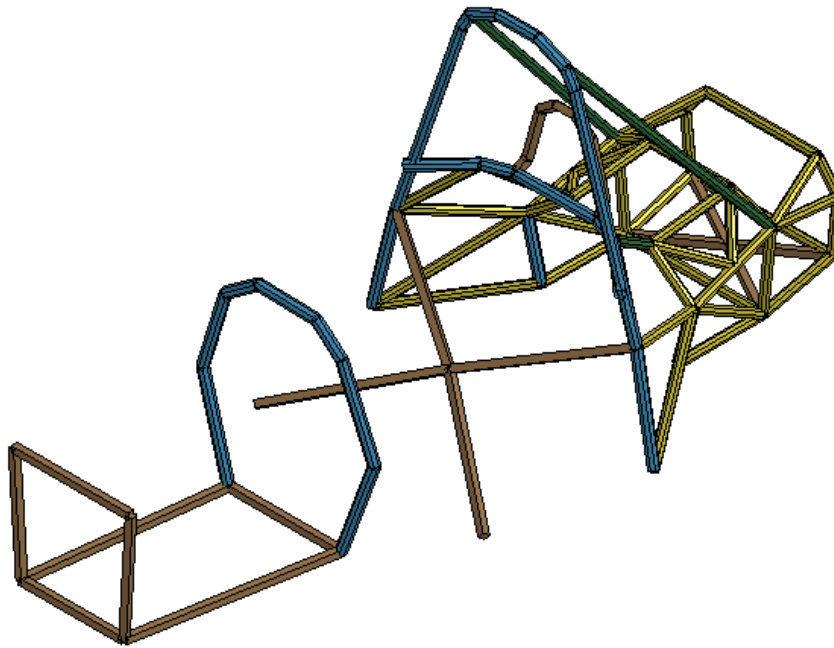


Imagen 56. Configuración 5

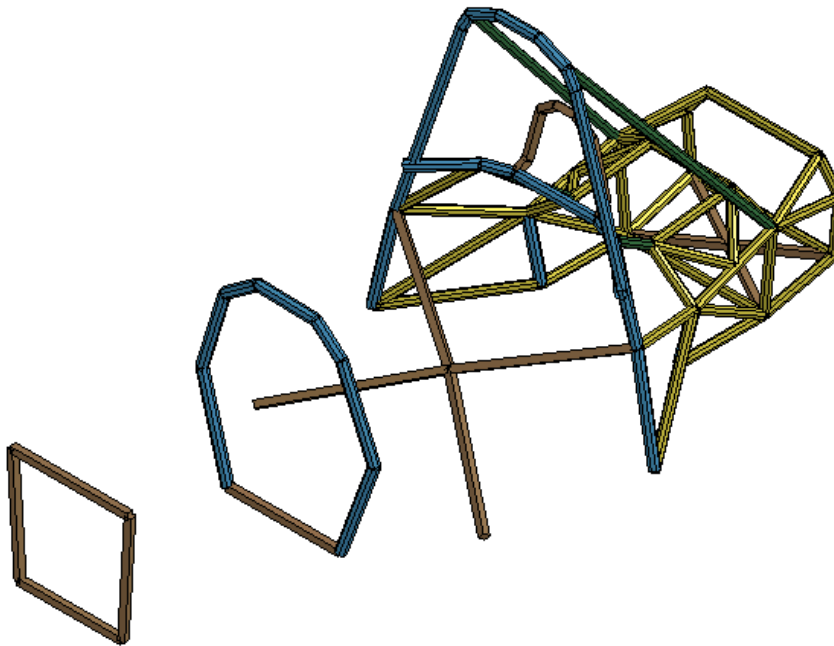


Imagen 57. Configuración 6

Los datos obtenidos se resumen en la siguiente tabla.

Configuración	Rigidez (N·m/°)	Peso (kg)
Referencia	1141,3	29,66
1	1285,4	31,213
2	2428,8	31,293
3	2405,5	30,978
4	2393,9	30,66
5	2391,6	30,35
6	2388,8	30,05

Basándose en estos resultados, se ha llegado a la conclusión de que la configuración los elementos que influyen en mayor medida en la rigidez son el elemento que cierra el arco frontal y los elementos que configuran la parte frontal del chasis, es decir la configuración que cumple una mejor relación rigidez/peso es la configuración 6, puesto que el resto añade demasiado peso para la rigidez que aporta. Sin embargo, la rigidez de esta configuración no es suficiente para alcanzar el objetivo establecido. Por tanto, se ha optado por una configuración similar a la configuración 6, con un laminado de 25 láminas en lugar de 20.

4.3.3 Configuración final

Como se ha establecido finalmente, la configuración final está constituida por una parte de acero, como la mostrada en la imagen 56, y otra de fibra de carbono. Las características de cada una de ellas se definen en la siguiente tabla.

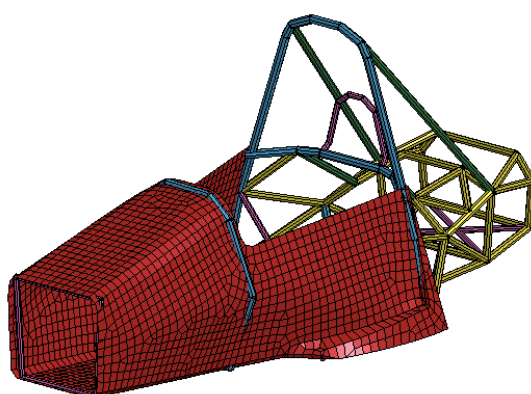


Imagen 58. Configuración final

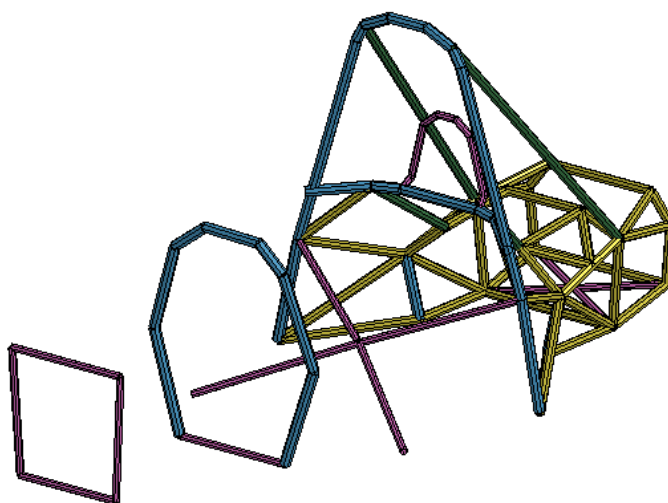


Imagen 59. Elementos de acero en el chasis

Color	Elemento o aplicación	Dimensión exterior x espesor
Sección 1	Arco principal y arco frontal. Barras de soporte de los hombros del piloto.	Tubos de sección circular de 28.575 mm x 4.22 mm de acero AISI 4130
Sección 2	Fijaciones del arnés de retención del conductor.	Tubos de sección circular de 25.0 mm x 1.75 mm
Sección 3	Soportes del mampara frontal y del los arcos principales y auxiliar.	Tubos de sección circular de 25.0 mm x 1.50 mm
Sección 4	Estructura auxiliar	Tubo de sección circular de 19.0 mm x 1.0 mm

Finalmente, los resultados obtenidos son, para una masa de 33,78 kg, se obtiene una rigidez de 3054,4 N·m/°.

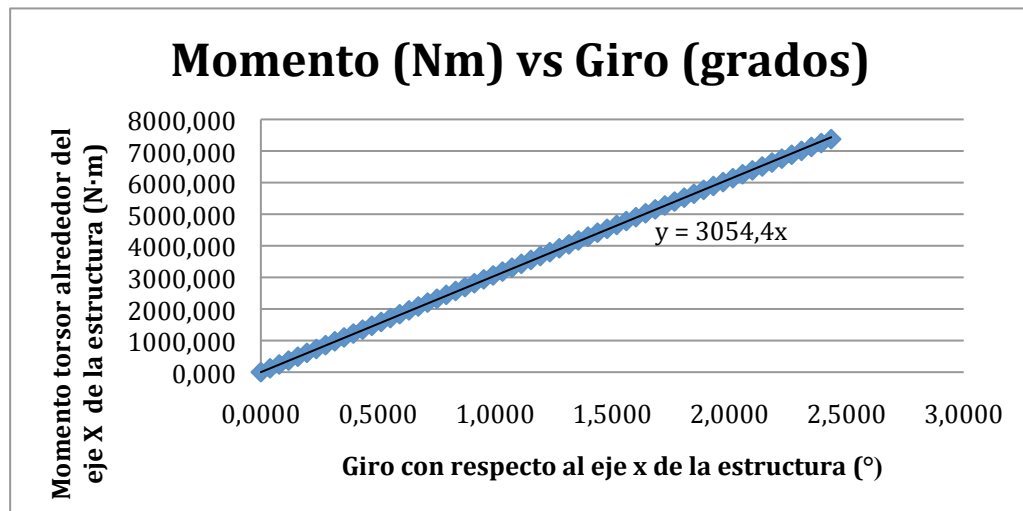


Imagen 60. Relación entre el momento torsor del chasis mixto de acero-fibra de carbono y el giro experimentado

Capítulo 5

Estimación de costes

El coste de fabricación de cada uno de estos modelos es un factor decisivo a la hora de evaluar cuál es la mejor opción. Por ello se ha realizado una estimación del coste de cada uno de ellos.

En la estimación de costes debemos tener en cuenta varios aspectos, como el coste de la materia prima, el coste de fabricación y el precio de las herramientas utilizadas.

5.1 Coste del chasis de acero

El coste del acero se detalla en la siguiente tabla, tomando un precio medio en la industria:

Uso	Coste por kg	Cantidad (kg)	Subtotal
Tubos de sección circular 28.575 mm x 4.22 mm	2,25€	7,34	16,52€
Tubos de sección circular 25.0 mm x 1.75 mm	2,25€	6,55	14,74€
Tubos de sección circular 25.0 mm x 1.50 mm	2,25€	8,62	19,40€
Tubos de sección circular 19 mm x 1,00 mm	2,25€	1,72	3,87€
Tubos de sección circular 25.0 mm x 0.50 mm	2,25€	8,97	20,18€
TOTAL			74,70€

Los trabajos de corte, doblado, mecanizado y soldado de una estructura de acero como la del chasis de acero que se estudia se ha podido estimar en unos 1000€, según el presupuesto proporcionado por “Pieracci Meccanica”, empresa italiana especializada en construcción de chasis de bicicletas, ciclomotores y motocicletas, contando con el corte, doblado y soldadura de todos los elementos del chasis.

CAPITULO 5 : ESTIMACIÓN DE COSTES

En total, serán aproximadamente, 1100€ por la fabricación del chasis en acero.

5.2 Coste del chasis combinado de aluminio y acero

El aluminio tiene un precio más elevado que el acero, por lo que el coste del material quedaría, para la primera versión:

Uso	Coste por kg	Cantidad (kg)	Subtotal
Tubos circulares de acero 28.575 mm x 4.22 mm	2,25€	7,34	16,52€
Tubos circulares de acero 25.0 mm x 1.75 mm	2,25€	6,55	14,74€
Tubos circulares de acero 25.0 mm x 1.50 mm	2,25€	8,62	19,40€
Tubos circulares de aluminio 19 mm x 1,00 mm	5,00€	3,03	15,15€
Tubos circulares de aluminio 25.0 mm x 0.50 mm	5,00€	0,58	2,90€
TOTAL			68,70€

Y para la segunda versión:

Uso	Coste por kg	Cantidad (kg)	Subtotal
Tubos circulares de acero 28.575 mm x 4.22 mm	2,25€	7,34	16,52€
Tubos circulares de aluminio 30.0 mm x 4,00 mm	2,25€	5,65	28,25€
Tubos circulares de aluminio 30.0 mm x 3,00 mm	2,25€	5,79	28,95€
Tubos circulares de aluminio 19 mm x 1,00 mm	5,00€	3,03	15,15€
Tubos circulares de aluminio 25.0 mm x 0.50 mm	5,00€	0,58	2,90€
TOTAL			91,77€

En el caso de herramientas y procesos para el aluminio, el número de empresas especializadas es considerablemente menor al de acero, por lo que es difícil estimar los costes. Sin embargo, puesto que requiere más cuidado en la fabricación y manipulación que el acero, y que la unión con éste se debe realizar con un proceso y complicado como es la soldadura CMT (Cold Metal Transfer) para no reducir las propiedades de ambos materiales ni de sus puntos de unión, la elaboración del chasis será presumiblemente más costosa que la de acero.

CAPITULO 5 : ESTIMACIÓN DE COSTES

Como estimación, se considerará el coste de fabricación aproximadamente dos veces el del acero, es decir, alrededor de 2000€.

Sumando estos datos, se tendrá un coste de 2070€ para la primera versión, y 2100€ para la segunda.

5.3 Coste del chasis mixto de fibra de carbono y acero

La superficie a cubrir por la fibra e carbono son 2,437 m². Por tanto, el coste del material es:

Material	Coste por kg.	Cantidad (kg)	Subtotal
Tubos de sección circular 28.575 mm x 4.22 mm	2,25€	7,34	16,52€
Tubos de sección circular 25.0 mm x 1.75 mm	2,25€	1,15	14,74€
Tubos de sección circular 25.0 mm x 1.50 mm	2,25€	5,49	19,40€
Tubos de sección circular 19 mm x 1,00 mm	2,25€	1,72	3,87€
Lámina de fibra de carbono + resina	100,00€	18,65	1865,22€
TOTAL			1919,75€

En cuanto a los procesos necesarios, se ha pedido información a 'Carbon Dream', una empresa especializada en fibra de carbono, con autoclave, para diferentes aplicaciones, como náutica, carrocerías, motores, etc. El precio orientativo que se ha dado para los procesos, que incluyen los materiales necesarios, la laminación, preparación de la superficie, aplicación de la resina, curado y cortado, es de unos 300€, sin autoclave, ya que el autoclave podría afectar a las propiedades del acero.

A todo esto se debe añadir el molde sobre el cuál se realiza todo el proceso. Este molde puede realizarse con varios materiales, sin embargo, la madera tratada es lo más económico del mercado, aunque requiere mayor trabajo de pulido y preparación de la superficie. En cuanto al precio

CAPITULO 5 : ESTIMACIÓN DE COSTES

orientativo, basándonos en los costes del año 2011 del E-Team, que precisó de un molde de las mismas características para la carrocería del ET4, la fabricación del molde estaría en torno a unos 700 €.

El coste total estimado para el chasis combinado de acero y fibra de carbono será de 2500€, contando con el coste de fabricación y manipulación del acero.

Capítulo 6

Comparativa de resultados

6.1 Comparativa de modelos

Los resultados finales se muestran en la siguiente tabla.

Modelo de chasis	Rigidez (N·m/°)	Peso (kg)	Coste estimado
Acero inicial ET4 (referencia)	2970,8	33,11	1100€
Acero (1ª modificación)	3033,4	33,2	1100€
Acero+Aluminio (versión 1ª)	2070,6	26,12	2070€
Acero+Aluminio (versión 2ª)	5379,3	22,39	2100€
Acero+Carbono	3054,4	33,78	2500€

Representando estos datos en gráficos de barras, se puede obtener una comparativa de los modelos.

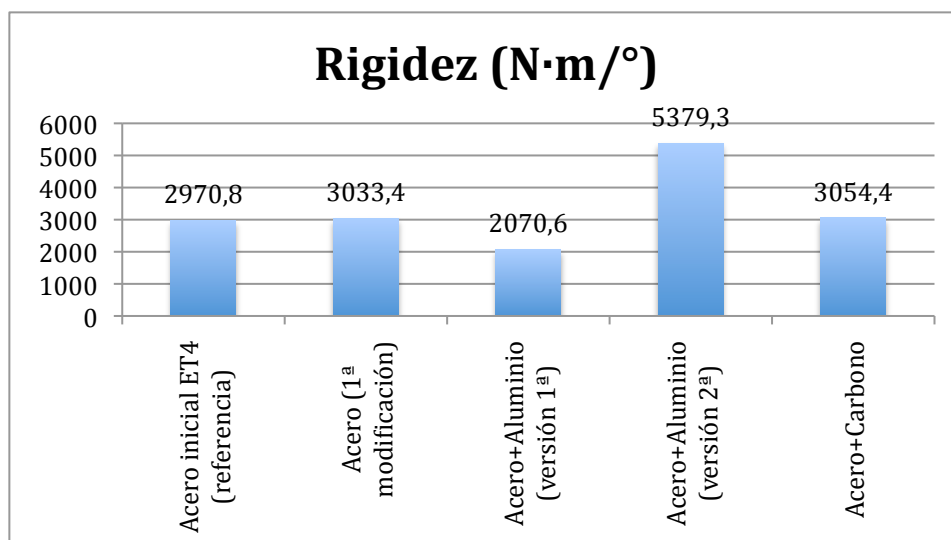


Imagen 61. Rigidez de cada uno de los modelos

CAPITULO 6 : COMPARATIVA DE RESULTADOS

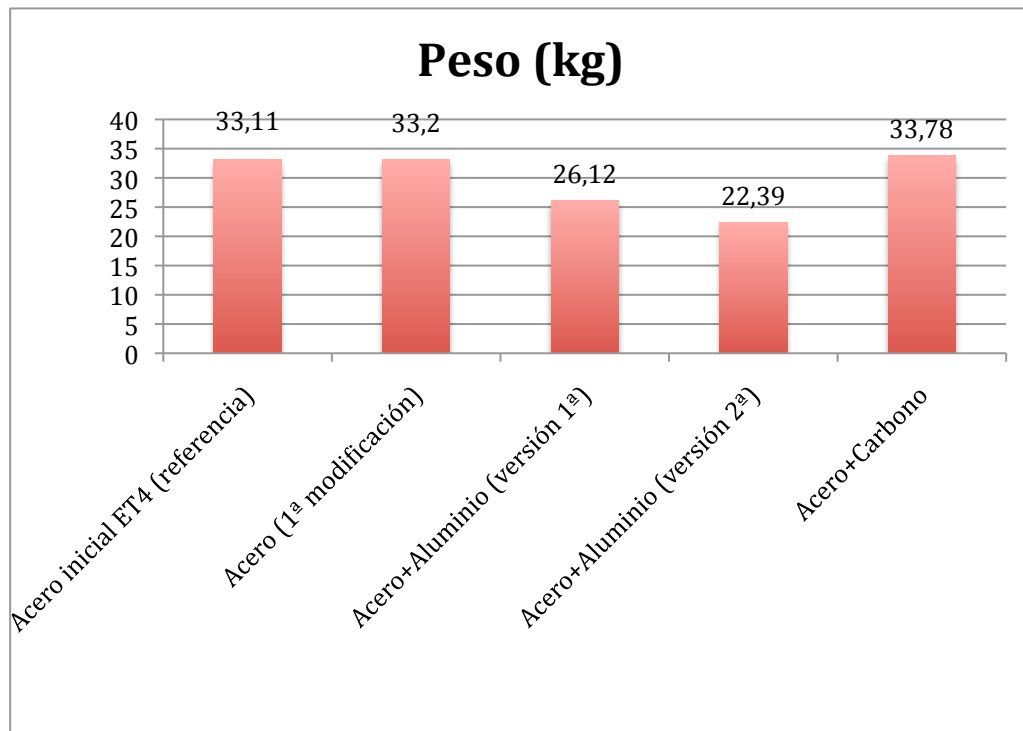


Imagen 62. Peso de cada uno de los modelos

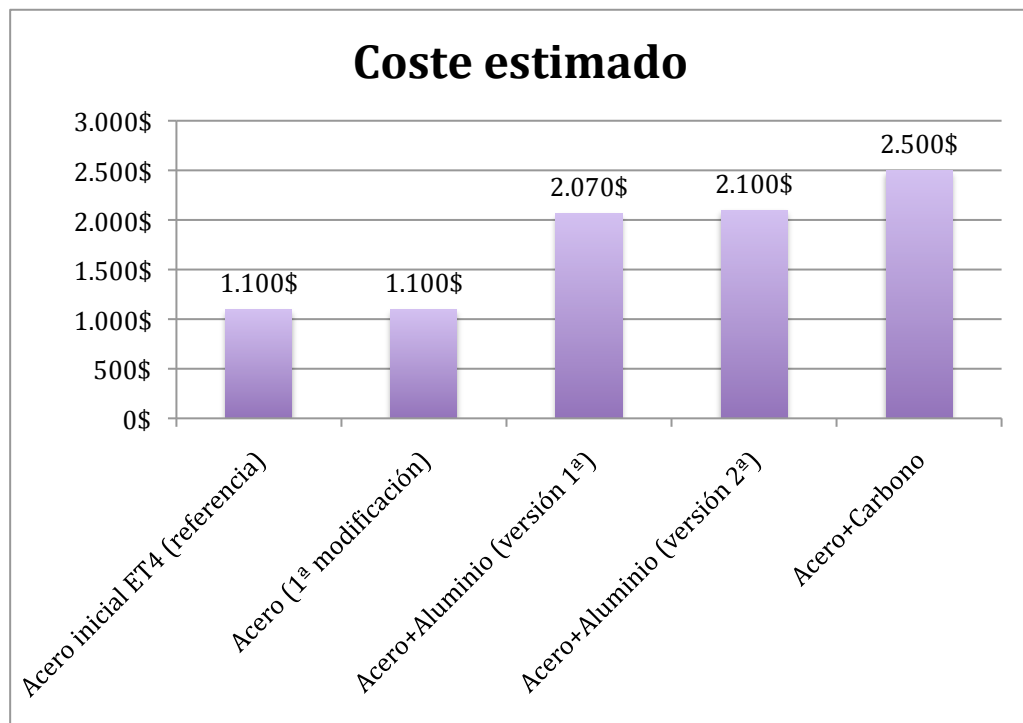


Imagen 63. Coste estimado de fabricación de cada uno de los modelos

CAPITULO 6 : COMPARATIVA DE RESULTADOS

Con el objetivo de realizar una comparativa de ambos modelos, se representa la relación entre la rigidez y el peso, y la rigidez y el coste de cada uno de los modelos. De esta manera se puede obtener una relación numérica que permita compararlos de manera cualitativa.

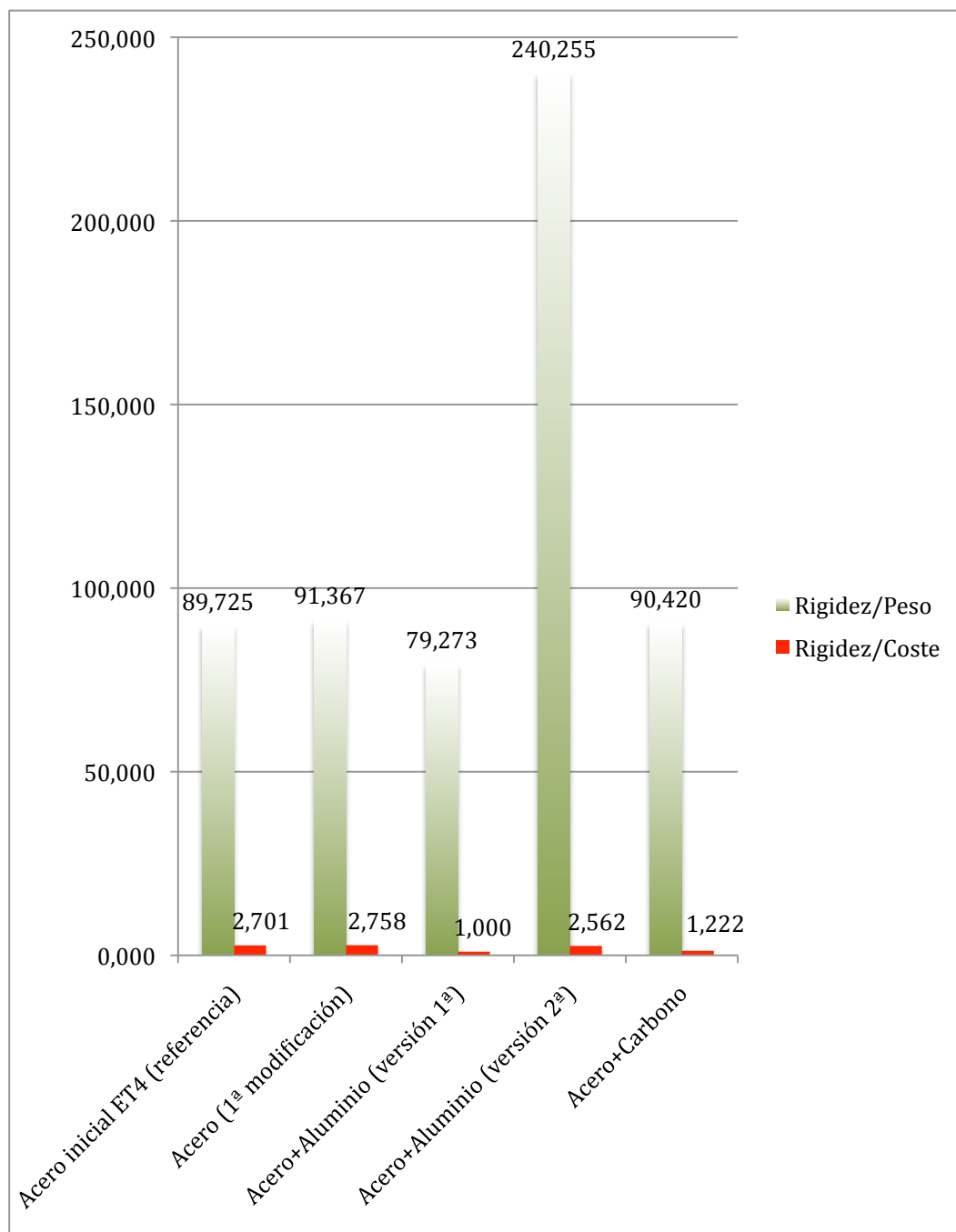


Imagen 64. Relación Rigidez/Peso y Rigidez/Coste de cada modelo

CAPITULO 6 : COMPARATIVA DE RESULTADOS

Estos resultados reflejan que el modelo más prometedor es la segunda versión de la combinación de acero y aluminio, puesto que aporta un aumento considerable de la rigidez, acompañado con una gran disminución del peso, que justificaría perfectamente el aumento en el coste. Hay que añadir que una rigidez torsional tan elevada excede en más de 2000 puntos el objetivo fijado de rigidez, que buscaba igualar los 2950 $\text{N}\cdot\text{m}/^\circ$ iniciales, por lo que es también susceptible de estudiar modificaciones para eliminar algunos elementos, disminuyendo la masa y la rigidez, a su vez.

Sin embargo, se debe considerar el peso global del vehículo incluyendo el resto de elementos. Es decir, en el caso de utilizar el chasis tubular de acero y/o aluminio se debe añadir el peso de la carrocería, que puede ser de material plástico, o compuestos de fibra de vidrio o fibra de carbono. Esto puede llegar a añadir incluso 20 kg al peso total. Esto significa que el modelo de fibra de carbono sería más adecuado, ya que la parte de la estructura de fibra de carbono actuaría además como carrocería, lo que puede suponer, para las dimensiones del modelo en cuestión, un ahorro de más de 10 kg en peso.

Si tenemos en cuenta la viabilidad de los diseños, el aluminio es el menos indicado, puesto que el número de empresas dedicadas a la manipulación del aluminio es más reducida que la del acero. En cuanto al material compuesto de fibra de carbono, con el material oportuno, y puesto que hemos descartado el autoclave, con unas instalaciones adecuadas, se puede realizar sin necesidad de recurrir a una empresa especializada, lo que supondría un ahorro también en mano de obra para el equipo.

6.2 Comparativa en función de la variación de las secciones

En base a los resultados obtenidos en el apartado 4.1.6, en el que se realizan variaciones del espesor de las distintas secciones, se puede establecer una relación entre la variación de la rigidez y la variación del peso, para ver la dependencia entre ambas magnitudes, como se muestra en la siguiente imagen.

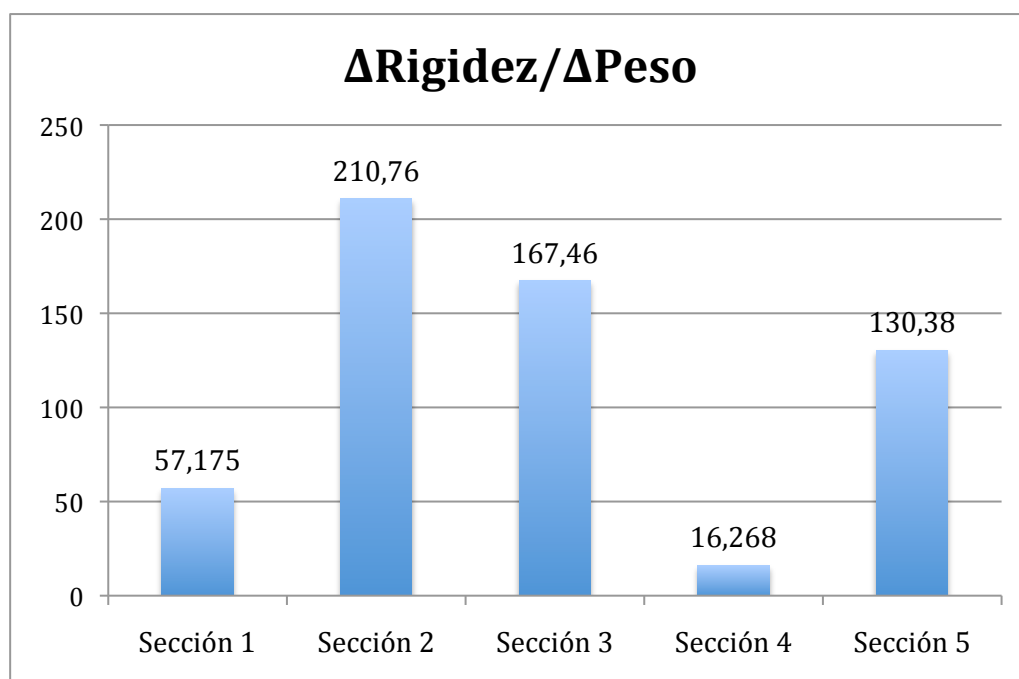


Imagen 65. Relación entra la variación de la rigidez y la variación del peso

Tras este análisis se puede establecer que las secciones menos críticas son las secciones auxiliares y la sección de los arcos frontal y principal (secciones 4,5 y 1, respectivamente), de modo que un cambio en el espesor de dichas secciones supone una variación muy pequeña en las propiedades del chasis. En la sección 5, la relación es superior ya que es la parte más pesada de la estructura.

La sección más crítica, es decir, la sección cuya variación en espesor afecta en mayor medida a las propiedades de la estructura, es la sección 2, la que comprende la estructura de protección contra impacto lateral. Sin embargo, una variación en el espesor de la sección dos, que incluye los soportes del mampara frontal y de los arcos principales y auxiliar, mampara de protección frontal, arco auxiliar delantero y fijaciones del arnés de retención del conductor, es también muy susceptible a un cambio.

Por tanto, teniendo en cuenta esta información, y considerando el peso de cada una de las partes, se considerarán como objeto de estudio para una optimización del presente chasis, las secciones 1, 4 y 5 en primer lugar.

6.3 Tensiones máximas soportadas

Con el fin de establecer una comparativa en función de las tensiones soportadas, se establece un desplazamiento máximo sobre el eje Z del punto de aplicación de las fuerzas de 2 cm, lo que supone un giro de $1,88^\circ$, aproximadamente, y se han medido las tensiones máximas soportadas. En el caso del acero y el aluminio, se ha medido la tensión equivalente de Von Mises, y en el caso de la fibra de carbono, puesto el criterio de Von Mises es válido sólo para materiales isótropos, se han medido las tensiones máximas en las direcciones 1 y 2 locales, y la tensión tangencial 1,2.

Además, hay que tener en cuenta los criterios de plastificación, o rotura en el caso de la fibra de carbono.

Material	Tensión Máxima (MPa)
Acero	610
Aluminio	145
Fibra de carbono (dirección 1)	880
Fibra de carbono (dirección 2)	880
Fibra de carbono (dirección 1,2)	84

Por tanto, los datos obtenidos son:

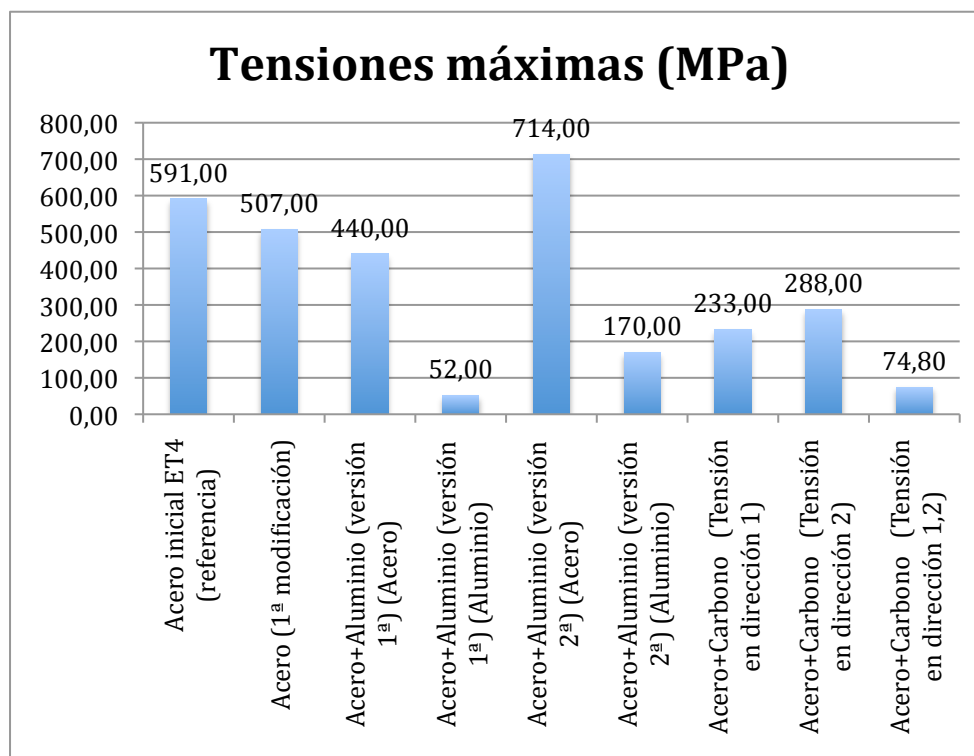


Imagen 66. Tensiones máximas soportadas

Sobre estos datos se puede decir que el modelo más resistente es el modelo combinado de acero y aluminio, en su segunda versión. Sin embargo, si consideramos el límite de plastificación, o rotura en el caso de la fibra de carbono, como límite de deformación, este modelo habría plastificado, tanto para el acero y el aluminio.

El resto de los modelos no plastifican o rompen al experimentar el desplazamiento establecido, lo que significa que soportarán un giro mayor antes de plastificar.

Capítulo 7

Conclusiones y trabajos futuros

En el presente documento se han propuesto diferentes configuraciones para optimizar un chasis de un vehículo de fórmula SAE.

Desde el punto de vista económico, se llegaría a la conclusión de que la mejor opción es continuar trabajando con el acero. Pero, debido a las limitaciones en la normativa, y a las experiencias de años anteriores, este tipo de chasis presenta muchas más limitaciones para desarrollar una nueva estructura con menor peso e igual o mayor rigidez torsional.

Por tanto, se establece que es necesario estudiar nuevos materiales que permiten más libertad de diseño, y más probabilidades de cumplir el objetivo de optimización de la relación rigidez/peso, aunque ello suponga un coste mayor, siempre dentro de unos límites razonables.

En caso de encontrar una empresa especializada en aluminio, esta configuración sería la más adecuada para futuros trabajos.

En cuanto a la fibra de carbono, es un material relativamente nuevo y que permite infinitas configuraciones. En este campo, las posibilidades de optimizar el chasis aumentan mucho más. Entre estas posibilidades se encuentran el uso de otros laminados, con diferentes orientaciones, diferentes combinaciones de espesores, en función de las exigencias de cada sección, o incluso el uso de materiales con núcleo de espuma o de nido de abeja, que aporta grandes propiedades con un peso notablemente

CAPITULO 7 : CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

menor que la fibra de carbono sola. Probablemente, esta última propuesta sería la más interesante de estudiar y la más fácil de realizar.

Finalmente, aunque en el presente documento se han supuesto y modelado condiciones ideales, la unión de diferentes materiales puede suponer un problema en términos de fabricación, además de que puede reducir las propiedades del conjunto de la estructura. Por lo que otro objeto de estudio futuro sería la interfase entre materiales, para tomar una decisión adecuada para el camino que deberá seguir el equipo E-Team en el futuro.

Referencias

- [1] www.eteamsquadracorse.it/. Web del equipo de Fórmula SAE de la Università di Pisa, Septiembre 2012.
- [2] www.sae.org. Web de la organización SAE Internacional, Agosto 2012.
- [3] A. Carnicero, *Introducción al método de elementos finitos*, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad regional de Córdoba.
- [4] Jesús Pernas Sánchez, *Simulación numérica del impacto de un sólido contra el agua*, Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid.
- [5] <http://dot.etec.wvu.edu/fsae/viking30.htm>, Web de la Western Washington University, Julio 2012.
- [6] <http://www.lionsracing.de/>, Web de la Technische Universität Braunschweig, Julio 2012.
- [7] "LS-DYNA Keyword User's Manual, version 970" Livermore Software Technology Corporation, Abril 2003.
- [8] "LS-PrePost Online Documentation, Tutorials", www2.lstc.com/lsp/Content/tutorials.shtml, Junio, 2008.
- [9] James K. Wessel, *Handbook of advanced materials*, John Wiley and Sons, Inc., Tennessee, 2004, pp. 89-128.
- [10] José Divo Bressan, Ricardo Kirchhof Unfer, *Construction and validation tests of a torsion test machine*, Journal of Materials Processing Technology 179, 2006, pp. 23-29.
- [11] J. Loughlan, M. Ata, *The analysis of carbon fibre composite box beams subjected to torsion with variable twist*, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 152, 1998, pp. 373-391.

REFERENCIAS

- [12] <http://ingenieriademateriales.wordpress.com/2009/04/17/manual-del-aluminio-y-sus-aleaciones/>. Agosto 2012.
 - [13] Antonio Gauchía Babé, *Modelo de torsión de la superestructura de un autobús*, Tesis doctoral, 2006.
 - [14] D. Hull, T. W. Clyne, *An introduction to composite materials*, Cambridge University Press, 13/08/1996 .
- www.carbondream.it, Octubre 2012.

Anexos

Anexo 1: “keyword” LS-Dyna del modelo de acero

ANEXO

```

$# LS-DYNA Keyword file created by LS-PrePost 3.1 -
07Sep2011(09:02)
$# Created on Oct-23-2012 (06:35:21)
*KEYWORD
*TITLE
$# title
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
*CONTROL_IMPLICIT_GENERAL
$# imflag      dt0      imform      nsbs      igs      cnstn
form      zero_v
          1  0.100000          2          1          2          0
0          1
*CONTROL_IMPLICIT_SOLVER
$# lsolvr      lprint      negev      order      drcm      drcprm
autospc      autotol
          4          0          2          0          1      0.000
1      0.000
$# lcpack
          2
*CONTROL_TERMINATION
$# endtim      endcyc      dtmin      endeng      endmas
8.000000      0      0.000      0.000      0.000
*DATABASE_BNDOUT
$#      dt      binary      lcur      ioopt
0.010000      0          0          1
*DATABASE_DEFGeo
$#      dt      binary      lcur      ioopt
0.010000      0          0          1
*DATABASE_ELOUT
$#      dt      binary      lcur      ioopt
0.010000      0          0          1
*DATABASE_GLSTAT
$#      dt      binary      lcur      ioopt
0.010000      0          0          1
*DATABASE_GLSTAT_MASS_PROPERTIES
$#      dt      binary      lcur      ioopt
0.010000      0          0          1
*DATABASE_MATSUM
$#      dt      binary      lcur      ioopt
0.010000      0          0          1
*DATABASE_RBDOUT
$#      dt      binary      lcur      ioopt
0.010000      0          0          1
*DATABASE_SECFORC
$#      dt      binary      lcur      ioopt
0.010000      0          0          1
*DATABASE_SPCFORC
$#      dt      binary      lcur      ioopt
0.010000      0          0          1
*DATABASE_SSSTAT
$#      dt      binary      lcur      ioopt
0.010000      0          0          1
*DATABASE_SSSTAT_MASS_PROPERTIES
$#      dt      binary      lcur      ioopt
0.010000      0          0          1

```

ANEXO

```

*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$#      dt      lcdt      beam      npltc      psetid
      0.010000      0      0      0      0
$#      ioopt
      0
*DATABASE_EXTENT_BINARY
$#      neiph      neips      maxint      strflg      sigflg      epsflg
rltflg      engflg
      0      0      3      0      1      1
1      1
$#      cmpflg      ieverp      beamip      dcomp      shge      stssz
n3thdt      ialemat
      0      0      4      1      1      1
2      1
$#      nintsld      pkp_sen      sclp      unused      msscl      therm
intout      nodout
      0      0      1.000000      0      0
0ALL      ALL
*DATABASE_EXTENT_BINARY
$#      neiph      neips      maxint      strflg      sigflg      epsflg
rltflg      engflg
      0      0      0      0      0      0
0      0
$#      cmpflg      ieverp      beamip      dcomp      shge      stssz
n3thdt      ialemat
      0      0      0      1      1      1
2      1
$#      nintsld      pkp_sen      sclp      unused      msscl      therm
intout      nodout
      0      0      1.000000      0      0
0STRESS      STRESS
*DATABASE_HISTORY_BEAM
$#
*LOAD_NODE_POINT
$#      nid      dof      lcld      sf      cid      ml
m2      m3
      86      3      1      1.000000      0      0
0      0
      95      3      2      1.000000      0      0
0      0
*PART
$# title
hoop
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
adpopt      tmid
      1      1      1      0      0      0
0      0
*SECTION_BEAM_TITLE
tubos hoop
$#      secid      elform      shrf      qr/irid      cst      scoor
nsm
      1      1      0.833300      2      1      0.000
0.000
$#      ts1      ts2      tt1      tt2      nsloc      ntloc
      28.575001 28.575001 24.358000 24.358000      0.000      0.000

```

ANEXO

```

*MAT_ELASTIC_TITLE
acero
$#      mid      ro      e      pr      da      db
not used
      1 7.8700E-6 2.1000E+8 0.300000      0.000      0.000
0
*PART
$# title
impacto
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
adpopt      tmid
      2      2      1      0      0      0
0      0
*SECTION_BEAM_TITLE
tubos impacto
$#      secid      elform      shrf      qr/irid      cst      scoor
nsm
      2      1 0.833300      2      1      0.000
0.000
$#      ts1      ts2      tt1      tt2      nsloc      ntloc
25.000000 25.000000 23.250000 23.250000      0.000      0.000
*PART
$# title
soporte
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
adpopt      tmid
      3      3      1      0      0      0
0      0
*SECTION_BEAM_TITLE
supports
$#      secid      elform      shrf      qr/irid      cst      scoor
nsm
      3      1 0.833300      2      1      0.000
0.000
$#      ts1      ts2      tt1      tt2      nsloc      ntloc
25.000000 25.000000 23.500000 23.500000      0.000      0.000
*PART
$# title
grupo_rueda_trasero_1
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
adpopt      tmid
      4      4      2      0      0      0
0      0
*SECTION_BEAM_TITLE
ruedas
$#      secid      elform      shrf      qr/irid      cst      scoor
nsm
      4      1 0.833300      2      1      0.000
0.000
$#      ts1      ts2      tt1      tt2      nsloc      ntloc
25.000000 25.000000 24.000000 24.000000      0.000      0.000
*MAT_RIGID_TITLE
ruedas traseras
$#      mid      ro      e      pr      n      couple
m      alias

```

ANEXO

```

2 7.8700E-6 2.1000E+8 0.300000 0.000 0.000
0.000
$# cmo con1 con2
1.000000 7 7
$# lco or a1 a2 a3 v1 v2 v3
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
*PART
$# title
grupo_rueda_delantero_1
$# pid secid mid eosid hgid grav
adpopt tmid
5 4 3 0 0 0
0 0
*MAT_RIGID_TITLE
ruedas delanteras
$# mid ro e pr n couple
m alias
3 7.8700E-6 2.1000E+8 0.300000 0.000 0.000
0.000
$# cmo con1 con2
0.000 0 0
$# lco or a1 a2 a3 v1 v2 v3
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
*PART
$# title
grupo_rueda_delantero_2
$# pid secid mid eosid hgid grav
adpopt tmid
6 4 3 0 0 0
0 0
*PART
$# title
grupo_rueda_trasero_2
$# pid secid mid eosid hgid grav
adpopt tmid
7 4 2 0 0 0
0 0
*PART
$# title
auxiliares 1
$# pid secid mid eosid hgid grav
adpopt tmid
8 5 1 0 0 0
0 0
*SECTION_BEAM_TITLE
auxiliar 1
$# secid elform shrf qr/irid cst scoor
nsm
5 1 0.833300 2 1 0.000
0.000
$# ts1 ts2 tt1 tt2 nsloc ntloc
25.000000 25.000000 24.500000 24.500000 0.000 0.000
*PART
$# title
auxiliares 2

```

ANEXO

```

$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
adpopt      9      6      1      0      0      0
0      0
*SECTION_BEAM_TITLE
auxiliar 2
$#      secid      elform      shrf      qr/irid      cst      scoor
nsm      6      1      0.833300      2      1      0.000
0.000
$#      ts1      ts2      tt1      tt2      nsloc      ntloc
19.000000 19.000000 18.000000 18.000000 0.000 0.000
*MAT_ELASTIC_TITLE
cuasirigido
$#      mid      ro      e      pr      da      db
not used      4      7.8700E-6      5.0000E+8      0.300000      0.000      0.000
0
*DEFINE_CURVE_TITLE
fuerza arriba
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo
dattyp      1      0      1.000000      1.000000      0.000      0.000
0
$#      a1      o1
0.000      0.000
1.000000      2.0000000e+006
2.0000000      4.0000000e+006
3.0000000      6.0000000e+006
4.0000000      8.0000000e+006
5.0000000      1.0000000e+007
6.0000000      1.2000000e+007
7.0000000      1.4000000e+007
8.0000000      1.6000000e+007
9.0000000      1.8000000e+007
10.0000000      2.0000000e+007
*DEFINE_CURVE_TITLE
fuerza abajo
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo
dattyp      2      0      1.000000      1.000000      0.000      0.000
0
$#      a1      o1
0.000      0.000
10.0000000      -2.0000000e+007
*ELEMENT_BEAM
$#
*NODE
$#
*END

```

Anexo 2: “keyword” LS-Dyna del modelo de acero/aluminio

ANEXO

```

$# LS-DYNA Keyword file created by LS-PrePost 3.1 -
07Sep2011(09:02)
$# Created on Oct-23-2012 (06:35:21)
*KEYWORD
*TITLE
$# title
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
*CONTROL_IMPLICIT_GENERAL
$# imflag      dt0      imform      nsbs      igs      cnstn
form      zero_v
          1  0.100000          2          1          2          0
0          1
*CONTROL_IMPLICIT_SOLVER
$# lsolvr      lprint      negev      order      drcm      drcprm
autospc      autotol
          4          0          2          0          1      0.000
1      0.000
$# lcpack
          2
*CONTROL_TERMINATION
$# endtim      endcyc      dtmin      endeng      endmas
8.000000      0      0.000      0.000      0.000
*DATABASE_BNDOUT
$#      dt      binary      lcur      ioopt
0.010000      0          0          1
*DATABASE_DEFGE0
$#      dt      binary      lcur      ioopt
0.010000      0          0          1
*DATABASE_ELOUT
$#      dt      binary      lcur      ioopt
0.010000      0          0          1
*DATABASE_GLSTAT
$#      dt      binary      lcur      ioopt
0.010000      0          0          1
*DATABASE_GLSTAT_MASS_PROPERTIES
$#      dt      binary      lcur      ioopt
0.010000      0          0          1
*DATABASE_MATSUM
$#      dt      binary      lcur      ioopt
0.010000      0          0          1
*DATABASE_RBDOUT
$#      dt      binary      lcur      ioopt
0.010000      0          0          1
*DATABASE_SECFORC
$#      dt      binary      lcur      ioopt
0.010000      0          0          1
*DATABASE_SPCFORC
$#      dt      binary      lcur      ioopt
0.010000      0          0          1
*DATABASE_SSSTAT
$#      dt      binary      lcur      ioopt
0.010000      0          0          1
*DATABASE_SSSTAT_MASS_PROPERTIES
$#      dt      binary      lcur      ioopt
0.010000      0          0          1

```


ANEXO

```

*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$#      dt      lcdt      beam      npltc      psetid
      0.010000      0      0      0      0
$#      ioopt
      0
*DATABASE_EXTENT_BINARY
$#      neiph      neips      maxint      strflg      sigflg      epsflg
rltflg      engflg
      0      0      3      0      1      1
1      1
$#      cmpflg      ieverp      beamip      dcomp      shge      stssz
n3thdt      ialemat
      0      0      4      1      1      1
2      1
$#      nintsld      pkp_sen      sclp      unused      msscl      therm
intout      nodout
      0      0      1.000000      0      0
0ALL      ALL
*DATABASE_EXTENT_BINARY
$#      neiph      neips      maxint      strflg      sigflg      epsflg
rltflg      engflg
      0      0      0      0      0      0
0      0
$#      cmpflg      ieverp      beamip      dcomp      shge      stssz
n3thdt      ialemat
      0      0      0      1      1      1
2      1
$#      nintsld      pkp_sen      sclp      unused      msscl      therm
intout      nodout
      0      0      1.000000      0      0
0STRESS      STRESS
*DATABASE_HISTORY_BEAM
$#
*LOAD_NODE_POINT
$#      nid      dof      lcld      sf      cid      ml
m2      m3
      86      3      1      1.000000      0      0
0      0
      95      3      2      1.000000      0      0
0      0
*PART
$# title
hoop
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
adpopt      tmid
      1      1      1      0      0      0
0      0
*SECTION_BEAM_TITLE
tubos hoop
$#      secid      elform      shrf      qr/irid      cst      scoor
nsm
      1      1      0.833300      2      1      0.000
0.000
$#      ts1      ts2      tt1      tt2      nsloc      ntloc
      28.575001 28.575001 24.358000 24.358000      0.000      0.000

```

ANEXO

```

*MAT_ELASTIC_TITLE
acero
$#      mid      ro      e      pr      da      db
not used
      1 7.8700E-6 2.1000E+8 0.300000      0.000      0.000
0
*PART
$# title
impacto
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
adpopt      tmid
      2      2      1      0      0      0
0      0
*SECTION_BEAM_TITLE
tubos impacto
$#      secid      elform      shrf      qr/irid      cst      scoor
nsm
      2      1 0.833300      2      1      0.000
0.000
$#      ts1      ts2      tt1      tt2      nsloc      ntloc
25.000000 25.000000 23.250000 23.250000      0.000      0.000
*PART
$# title
soporte
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
adpopt      tmid
      3      3      1      0      0      0
0      0
*SECTION_BEAM_TITLE
supports
$#      secid      elform      shrf      qr/irid      cst      scoor
nsm
      3      1 0.833300      2      1      0.000
0.000
$#      ts1      ts2      tt1      tt2      nsloc      ntloc
25.000000 25.000000 23.500000 23.500000      0.000      0.000
*PART
$# title
grupo_rueda_trasero_1
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
adpopt      tmid
      4      4      2      0      0      0
0      0
*SECTION_BEAM_TITLE
ruedas
$#      secid      elform      shrf      qr/irid      cst      scoor
nsm
      4      1 0.833300      2      1      0.000
0.000
$#      ts1      ts2      tt1      tt2      nsloc      ntloc
25.000000 25.000000 24.000000 24.000000      0.000      0.000
*MAT_RIGID_TITLE
ruedas traseras
$#      mid      ro      e      pr      n      couple
m      alias

```

ANEXO

```

2 7.8700E-6 2.1000E+8 0.300000 0.000 0.000
0.000
$# cmo con1 con2
1.000000 7 7
$# lco or a1 a2 a3 v1 v2 v3
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
*PART
$# title
grupo_rueda_delantero_1
$# pid secid mid eosid hgid grav
adpopt tmid
5 4 3 0 0 0
0 0
*MAT_RIGID_TITLE
ruedas delanteras
$# mid ro e pr n couple
m alias
3 7.8700E-6 2.1000E+8 0.300000 0.000 0.000
0.000
$# cmo con1 con2
0.000 0 0
$# lco or a1 a2 a3 v1 v2 v3
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
*PART
$# title
grupo_rueda_delantero_2
$# pid secid mid eosid hgid grav
adpopt tmid
6 4 3 0 0 0
0 0
*PART
$# title
grupo_rueda_trasero_2
$# pid secid mid eosid hgid grav
adpopt tmid
7 4 2 0 0 0
0 0
*PART
$# title
auxiliares 1
$# pid secid mid eosid hgid grav
adpopt tmid
8 5 1 0 0 0
0 0
*SECTION_BEAM_TITLE
auxiliar 1
$# secid elform shrf qr/irid cst scoor
nsm
5 1 0.833300 2 1 0.000
0.000
$# ts1 ts2 tt1 tt2 nsloc ntloc
25.000000 25.000000 24.500000 24.500000 0.000 0.000
*PART
$# title
auxiliares 2

```

ANEXO

```

$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
adpopt      9      6      1      0      0      0
0      0
*SECTION_BEAM_TITLE
auxiliar 2
$#      secid      elform      shrf      qr/irid      cst      scoor
nsm      6      1      0.833300      2      1      0.000
0.000
$#      ts1      ts2      tt1      tt2      nsloc      ntloc
19.000000 19.000000 18.000000 18.000000 0.000 0.000
*MAT_ELASTIC_TITLE
cuasirigido
$#      mid      ro      e      pr      da      db
not used      4      7.8700E-6      5.0000E+8      0.300000      0.000      0.000
0
*DEFINE_CURVE_TITLE
fuerza arriba
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo
dattyp      1      0      1.000000      1.000000      0.000      0.000
0
$#      a1      o1
0.000      0.000
1.000000      2.0000000e+006
2.0000000      4.0000000e+006
3.0000000      6.0000000e+006
4.0000000      8.0000000e+006
5.0000000      1.0000000e+007
6.0000000      1.2000000e+007
7.0000000      1.4000000e+007
8.0000000      1.6000000e+007
9.0000000      1.8000000e+007
10.0000000      2.0000000e+007
*DEFINE_CURVE_TITLE
fuerza abajo
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo
dattyp      2      0      1.000000      1.000000      0.000      0.000
0
$#      a1      o1
0.000      0.000
10.0000000      -2.0000000e+007
*ELEMENT_BEAM
$#
*NODE
$#
*END

```

Anexo 3: “keyword” LS- Dyna del modelo de acero- fibra de carbono

ANEXO

```

$# LS-DYNA Keyword file created by LS-PrePost 4.0 (Beta) -
22Sep2012(18:40)
$# Created on Oct-24-2012 (13:46:51)
*KEYWORD
*TITLE
$# title
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
*CONTROL_IMPLICIT_GENERAL
$# imflag      dt0      imform      nsbs      igs      cnstn
form      zero_v
      1  0.100000      2      1      2      0
0      1
*CONTROL_IMPLICIT_SOLVER
$# lsolvr      lprint      negev      order      drcm      drcprm
autospc      autotol
      4      2      2      0      1      0.000
1      0.000
$# lcpack
      2
*CONTROL_SHELL
$# wrpang      esort      irnxx      istupd      theory      bwc
miter      proj
      120.00000      0      -1      0      2      2
1      0
$# rotascl      intgrd      lamsht      cstyp6      tshell      nfail1
nfail4      psnfail
      1.000000      0      0      1      0      0
0      0
$# psstupd      irquad      cntco      itsflg      irquad
      0      0      0      0      2
*CONTROL_TERMINATION
$# endtim      endcyc      dtmin      endeng      endmas
      6.000000      0      0.000      0.000      0.000
*DATABASE_BNDOUT
$#      dt      binary      lcur      ioopt
      0.010000      0      0      1
*DATABASE_DEFGeo
$#      dt      binary      lcur      ioopt
      0.010000      0      0      1
*DATABASE_ELOUT
$#      dt      binary      lcur      ioopt
      0.010000      0      0      1
*DATABASE_SPCFORC
$#      dt      binary      lcur      ioopt
      0.010000      0      0      1
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$#      dt      lcdt      beam      npltc      psetid
      0.010000      0      0      0      0
$#      ioopt
      0
*DATABASE_EXTENT_BINARY
$#      neiph      neips      maxint      strflg      sigflg      epsflg
rltflg      engflg
      0      0      3      0      1      1
1      1

```

ANEXO

```

$# cmpflg   ieverp   beamip   dcomp   shge   stssz
n3thdt   ialemat
      0      0      4      1      1      1
2      1
$# nintsld   pkp_sen   sclp   unused   msscl   therm
intout   nodout
      0      0  1.000000      0      0
0ALL      ALL
$#   dtdt   resplt
      0      0
*DATABASE_HISTORY_BEAM
$#   id1   id2   id3   id4   id5   id6
id7   id8
*LOAD_NODE_POINT
$#   nid   dof   lcid   sf   cid   m1
m2   m3
      3508      3      1  1.000000      0      0
0      0
      3517      3      2  1.000000      0      0
0      0
*PART
$# title
LSHELL1
$#   pid   secid   mid   eosid   hgid   grav
adpopt   tmid
      1      7      5      0      0      0
0      0
*SECTION_SHELL_TITLE
fibra
$#   secid   elform   shrf   nip   propt   qr/irid
icomp   setyp
      7      16  0.833300      5      1      0
0      1
$#   t1      t2      t3      t4   nloc   marea
idof   edgset
  4.875000  4.875000  4.875000  4.875000  0.000  0.000
0.000      0
*MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC_TITLE
fibra de carbono
$#   mid   ro   ea   eb   ec   prba
prca   prcb
      5 1.5700E-6 6.8000E+7 6.8000E+7 1.0000E+7 0.220000
0.072059 0.072059
$#   gab   gbc   gca   aopt   g   sigf
  5.0000E+6 4.5000E+6 4.5000E+6 3.000000 0.000 0.000
$#   xp   yp   zp   al   a2   a3
macf
      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
1
$#   v1      v2      v3      d1      d2      d3
beta   ref
  1.000000 0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
0.000      0.000
*PART
$# title

```

ANEXO

```

hoop
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
adpopt      tmid
          2          1          1          0          0          0
0          0
*SECTION_BEAM_TITLE
tubos hoop
$#      secid      elform      shrf      qr/irid      cst      scoor
nsm
          1          1  0.833300          2          1      0.000
0.000
$#      ts1      ts2      tt1      tt2      nsloc      ntloc
  28.575001  28.575001  24.358000  24.358000      0.000      0.000
*MAT_ELASTIC_TITLE
acero
$#      mid      ro      e      pr      da      db
not used
          1  7.8700E-6  2.1000E+8  0.300000      0.000      0.000
0
*PART
$# title
impacto
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
adpopt      tmid
          3          2          1          0          0          0
0          0
*SECTION_BEAM_TITLE
tubos impacto
$#      secid      elform      shrf      qr/irid      cst      scoor
nsm
          2          1  0.833300          2          1      0.000
0.000
$#      ts1      ts2      tt1      tt2      nsloc      ntloc
  25.000000  25.000000  23.250000  23.250000      0.000      0.000
*PART
$# title
soporte
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
adpopt      tmid
          4          3          1          0          0          0
0          0
*SECTION_BEAM_TITLE
supports
$#      secid      elform      shrf      qr/irid      cst      scoor
nsm
          3          1  0.833300          2          1      0.000
0.000
$#      ts1      ts2      tt1      tt2      nsloc      ntloc
  25.000000  25.000000  23.500000  23.500000      0.000      0.000
*PART
$# title
grupo_rueda_trasero_1
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
adpopt      tmid

```


ANEXO

```

0          5          4          2          0          0          0
0          0
*SECTION_BEAM_TITLE
ruedas
$#      secid      elform      shrf      qr/irid      cst      scoor
nsm
          4          1  0.833300          2          1      0.000
0.000
$#      ts1      ts2      tt1      tt2      nsloc      ntloc
25.000000 25.000000 24.000000 24.000000 0.000 0.000
*MAT_RIGID_TITLE
ruedas traseras
$#      mid      ro      e      pr      n      couple
m      alias
          2  7.8700E-6 2.1000E+8 0.300000 0.000 0.000
0.000
$#      cmo      con1      con2
1.000000 7 7
$# lco or a1      a2      a3      v1      v2      v3
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
*PART
$# title
grupo_rueda_delantero_1
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
adpopt      tmid
          6          4          3          0          0          0
0          0
*MAT_RIGID_TITLE
ruedas delanteras
$#      mid      ro      e      pr      n      couple
m      alias
          3  7.8700E-6 2.1000E+8 0.300000 0.000 0.000
0.000
$#      cmo      con1      con2
0.000 0 0
$# lco or a1      a2      a3      v1      v2      v3
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
*PART
$# title
grupo_rueda_delantero_2
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
adpopt      tmid
          7          4          3          0          0          0
0          0
*PART
$# title
grupo_rueda_trasero_2
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
adpopt      tmid
          8          4          2          0          0          0
0          0
*PART
$# title
auxiliares 1

```

ANEXO

```

$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
adpopt      9      5      1      0      0      0
0      0
*SECTION_BEAM_TITLE
auxiliar 1
$#      secid      elform      shrf      qr/irid      cst      scoor
nsm      5      1      0.833300      2      1      0.000
0.000
$#      ts1      ts2      tt1      tt2      nsloc      ntloc
25.000000 25.000000 24.500000 24.500000 0.000 0.000
*PART
$# title
auxiliares 2
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
adpopt      10      6      1      0      0      0
0      0
*SECTION_BEAM_TITLE
auxiliar 2
$#      secid      elform      shrf      qr/irid      cst      scoor
nsm      6      1      0.833300      2      1      0.000
0.000
$#      ts1      ts2      tt1      tt2      nsloc      ntloc
19.000000 19.000000 18.000000 18.000000 0.000 0.000
*DEFINE_CURVE_TITLE
fuerza arriba
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo
dattyp      1      0      1.000000 1.000000 0.000 0.000
0
$#      a1      o1
0.000 0.000
1.000000 2.000000e+06
2.000000 4.000000e+06
3.000000 6.000000e+06
4.000000 8.000000e+06
5.000000 1.000000e+07
6.000000 1.200000e+07
7.000000 1.400000e+07
8.000000 1.600000e+07
9.000000 1.800000e+07
10.000000 2.000000e+07
*DEFINE_CURVE_TITLE
fuerza abajo
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo
dattyp      2      0      1.000000 1.000000 0.000 0.000
0
$#      a1      o1
0.000 0.000
10.000000 -2.000000e+07
*ELEMENT_SHELL

```

ANEXO

```
$#    eid    pid    n1    n2    n3    n4    n5
n6      n7      n8

*ELEMENT_BEAM
$#    eid    pid    n1    n2    n3    rt1    rr1
rt2      rr2    local

*NODE
$#    nid          x          y          z
tc      rc

*END
```

Anexo 4: Presentación

